

行政院國家科學委員會專其研究計畫成果報告

探討高溫超導體 YBCO 在不同溫度時磁浮力之改變

計畫編號：NSC90-2112-M-032-012

執行時間：90 年 8 月 1 日 至 91 年 10 月 31 日

計畫主持人：陳偉正

處理方式：可立即對外提供參考

執行單位：淡江大學物理系
中華民國 91 年 12 月 10 日

摘要

本計畫乃探討在不同溫度下磁浮力的量測,並找出超導體 $\text{Y}_1\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ 磁化率與磁浮力的關係。超導樣品經過晶種長晶法處理,並添加百分之四十莫耳比例的 $\text{Y}_2\text{Ba}_1\text{Cu}_1\text{O}_{5-x}$,以增加樣品顆粒的大小如此便增大其電流密度。我們利用一個封閉式的低溫系統(20k-300k),和一個電子天秤,作為磁浮力的測量儀器。控制的溫度為 40k,50k,60k,70k,77k,85k,並在零場冷下進行實驗。同時利用 SQUID 直接測量樣品的磁化率,之後使用程式從磁浮力來計算樣品電流密度,和使用磁化率來計算電流密度,藉由得到的結果來比較磁浮力與磁化率的關係。

關鍵字:超導體,磁浮力,磁化率

Abstract

This project is intended to study the magnetization of $\text{Y}_1\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ Superconductor as a function of temperature by magnetic levitation force. The superconductor sample is prepared by seeded-melt growth (SMG) method, and add 40% of $\text{Y}_2\text{Ba}_1\text{Cu}_1\text{O}_{5-x}$ in mole to $\text{Y}_1\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ to improve both the grain size and the properties of the sample. We use a close cryogenic system (20k-300k), and a electronic balance, to measure magnetic levitation force, under zero field cooling condition at six different temperature (40k, 50k, 60k, 70k, 77k, 85k). We also used SQUID to measure the corresponding magnetization curves for our sample directly. We compare the critical current density (J_c) obtained by fitting our measured magnetic levitation force with the value obtained by magnetization measurement with SQUID.

Key words: Superconductor
Magnetic levitation force
Magnetization

目錄

第一章 前言.....	8
1-1 釔鋇銅氧超導體簡介.....	8
1-2 何謂超導體磁浮力.....	10
1-3 研究目的.....	11
第二章 樣品的製作與儀器.....	13
2-1 晶種的製作.....	13
2-2 YBCO 大顆粒晶體的製作.....	14
2-3 實驗儀器.....	15
第三章 實驗方法與步驟.....	20
3-1 系統架構.....	20
3-2 實驗流程.....	21
第四章 實驗理論.....	25
4-1 磁浮力的計算.....	25
4-2 磁化率與電流密度.....	26
4-3 比較磁浮力與磁化率.....	27
第五章 結果與討論.....	32
5-1 磁浮力量測與模擬結果.....	32
5-2 磁浮力與磁化率的比較.....	32

5-3 討論.....	32
-------------	----

參考資料.....	49
-----------	----

圖表目錄

圖(1-1) 理想導體與超導體的差異.....	9
圖(1-2) 第一類超導體 M-H 圖.....	9
圖(1-3) 第二類超導體 M-H 圖.....	9
圖(1-4) 電流密度,溫度,磁場之關係圖.....	10
圖(2-1) SmBCO123+211 燒結溫度.....	18
圖(2-2) YBCO123+211 燒結溫度.....	18
圖(2-3) YBCO123+211 補氧溫度.....	19
圖(3-1) 系統架構圖.....	23
圖(3-2) 低溫腔圖.....	23
圖(3-3) 磁場模擬比較圖.....	24
圖(3-4) 數據原始圖.....	24
圖(4-1) 計算磁浮力示意圖(一).....	25
圖(4-2) 計算磁浮力示意圖(二).....	25
圖(4-3) 磁化率圖 Sample1(40k-60k).....	29
圖(4-4) 磁化率圖 Sample1(70k-85k).....	29
圖(4-5) 磁化率圖 Sample2(40k-60k).....	30
圖(4-6) 磁化率圖 Sample2(70k-85k).....	30
圖(4-7) 磁化率圖 Sample3(40k-60k).....	31
圖(4-8) 磁化率圖 Sample3(70k-85k).....	31
圖(5-1) 磁浮力比較圖 Sample1-40k.....	35
圖(5-2) 磁浮力比較圖 Sample1-50k.....	35
圖(5-3) 磁浮力比較圖 Sample1-60k.....	36
圖(5-4) 磁浮力比較圖 Sample1-70k.....	36
圖(5-5) 磁浮力比較圖 Sample1-77k.....	37
圖(5-6) 磁浮力比較圖 Sample1-85k.....	37
圖(5-7) 磁浮力比較圖 Sample2-40k.....	38
圖(5-8) 磁浮力比較圖 Sample2-50k.....	38
圖(5-9) 磁浮力比較圖 Sample2-60k.....	39
圖(5-10) 磁浮力比較圖 Sample2-70k.....	39
圖(5-11) 磁浮力比較圖 Sample2-77k.....	40
圖(5-12) 磁浮力比較圖 Sample2-85k.....	40
圖(5-13) 磁浮力比較圖 Sample3-40k.....	41
圖(5-14) 磁浮力比較圖 Sample3-50k.....	41
圖(5-15) 磁浮力比較圖 Sample3-60k.....	42
圖(5-16) 磁浮力比較圖 Sample3-70k.....	42
圖(5-17) 磁浮力比較圖 Sample3-77k.....	43
圖(5-18) 磁浮力比較圖 Sample3-85k.....	43

圖(5-19) 樣品表面圖.....	44
圖(5-20) X-ray 繞射圖(粉末).....	45
圖(5-21) X-ray 繞射圖(塊材).....	45
圖(5-22) 電流密度比較圖 Sample1(40k-60k).....	46
圖(5-23) 電流密度比較圖 Sample1(70k-85k).....	46
圖(5-24) 電流密度比較圖 Sample2(40k-60k).....	47
圖(5-25) 電流密度比較圖 Sample2(70k-85k).....	47
圖(5-26) 電流密度比較圖 Sample3(40k-60k).....	48
圖(5-27) 電流密度比較圖 Sample3(70k-85k).....	48

第一章 前言

1-1 鈮鉕銅氧超導體簡介

1-1.1 超導體的基本特性

<絕對溫度 K>

由 Kelvin 建立的絕對溫標，目的為方便熱力學中理想氣體的討論。絕對溫度零度即是理論上的最低溫度，相當於 -273.15°C ，本實驗中使用 K 作為溫度的單位，其中有一些具有代表性的溫度，如 300K (室溫 27°C)，273K(水的凝固點)，77K(液態氮溫度)。

臨界溫度>

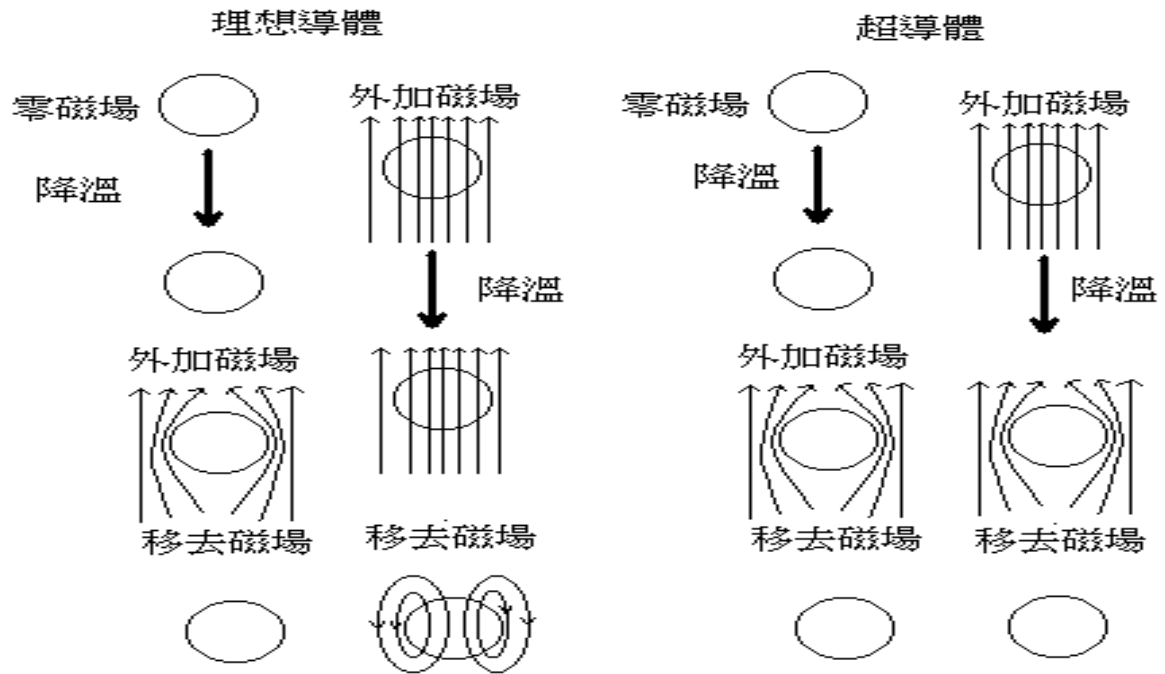
超導體由正常態(Normal state)到超導態(Superconducting state)相變(Phase transitions)產生時的溫度稱之為臨界溫度 T_c ，在無外加磁場或電流之下 YBCO 的 T_c 大約在 80 ~ 90 K 之間，目前世界上超導體 T_c 最高可以達到 130 K 以上，當然，越高的 T_c 對於現實生活的應用越有幫助。而鈮鉕銅氧材料的超導體價值就在於它的 T_c 高於液態氮的溫度(77K)，對於實驗的成本與方便性有很大的助益。

<零電阻>

超導體在超導態中是沒有電阻產生的^[1]，也就是說電子可以在超導塊材中自由運動不受阻礙。在實驗量測上成為超導態前和成為超導態後，電阻的大小相差了有 10^4 倍，明顯看出溫度在 T_c 時電阻的變化。

<抗磁性> (Diamagnetism)

理想導體和超導體都會有零電阻的現象,但在磁場中冷卻時發現，只有超導體顯示出 Meissner 抗磁性^[2]，所以要解釋超導理論需同時滿足零電阻和抗磁性效應。Meissner 效應可由圖(1-1)做一個簡單的說明。



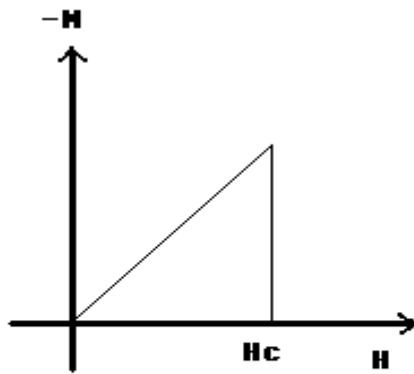
圖(1-1) 在外加磁場下冷卻可以看出理想導體與超導體的差異

1-1.2 非理想第二類超導體

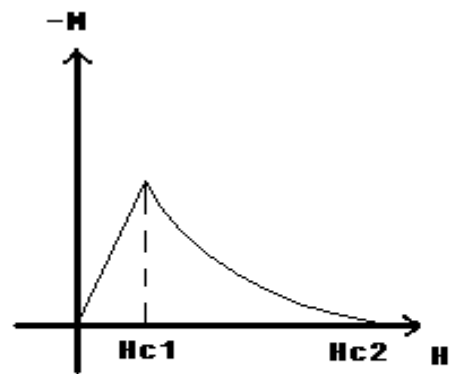
第一類與第二類超導體^[3]主要的區別在於，外加磁場在超導體內部產生不同的效應。

以第一類超導體而言，多半為較低 T_c 的純金屬，其相干長度遠超過磁場穿透深度。在磁場強度小於 H_c (臨界磁場)前，抗磁的磁化強度如圖(1-2)，這是理想的 Meissner 效應。當磁場大於 H_c 時，也就是在強磁場之下磁化強度立刻變為零，超導體回到正常態。

第二類超導體與第一類超導體不同的是，當外加磁場大於 H_c 時，磁化強度不會立刻變為零，而是隨磁場越大而變小(磁化強度為負值)，如圖(1-3)，因此第二類超導體上有臨界磁場 H_{c1} ，和下臨界磁場 H_{c2} ， H_{c2} 即是外加磁場增加到超導體失去超導態的磁場

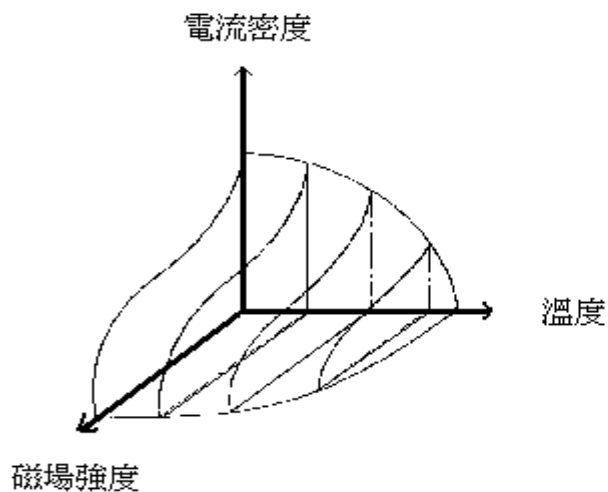


圖(1-2)



圖(1-3)

在應用上，第二類超導體因可以有很大的 H_{c2} ，所以比起第一類超導體來的實用。圖(1-4)可以看出第二類超導體在不同溫度下與磁場的關係^[4]。



圖(1-4)

曲線以內為超導態以外為正常態，而此曲面稱之為臨界面，由電流，溫度，磁場決定其大小。

理想與非理想第二類超導體的差異是在於，非理想第二類超導體中有高密度的缺陷，這些缺陷是磁通子進入樣品之後，產生釘扎力的地方稱之釘扎中心，而釘扎力就會阻礙磁通線的運動，所以非理想第二類超導體的磁滯就較明顯。

1-2 何謂超導體磁浮力

1-2.1 磁浮力的定義

<感應磁場>

Faraday 和 Lenz 定律中說明當一個永久磁鐵接近一導體線圈時，因磁通量

的改變而感應出一電流來抵抗其變化，此感應電流所感應出的磁場方向與永久磁鐵相反，可以用來解釋超導體內的超導電流的理論基礎。

<屏障電流與反磁性>

如果上述導體改用超導體來產生感應電流，因其中沒有電阻的消耗，臨界電流密度值將會很大，而聚集在表面上，稱之為屏障電流。由 Meissner 效應得知當外加磁場要進入超導體時，此時會感應出一電流來阻止磁場進入，磁場越強，電流密度越大，直到外加磁場大於 H_{c1} 時，電流密度才會改變其型態。而在 H_{c1} 以下磁場漸減時，電流密度亦隨著磁場變小。這種力的方向與永久磁鐵的磁場方向相反大小與磁場成正比，可是做一種阻力，或說是反磁性，相當於用天秤量測時所讀到讀數減少的值。

<磁懸浮>

討論過外加磁場小於 H_{c1} 的情形後，另一種型態的力是當磁力線(亦稱為磁通子)，進入了穿透深度^[5]以內的區域，當磁通子進入之後會找到樣品內晶格缺陷的地方固定住，像釘子一樣釘住，稱之為釘扎，而要移動這些釘子所需的力稱之為釘扎力。所以磁場逐漸變小時，這些磁通子會在原地不動，像是對磁鐵產生了一股吸力，如果吸力大於樣品重量的話，將可以明顯看見樣品被吸引起懸掛在磁鐵上的情形，亦稱之磁懸浮。

1-2.2 發展與應用

<超導磁鐵>

利用超導體所作的磁鐵可以達到 20 ~ 40 Tesla，是目前世界上最強的磁場，這樣的磁場對許多物體的檢測有非常大的突破，理論上的發展也非常有幫助。

<工業發展>

因為超導體有產生強大磁場的能力，所以在工業上有其發揮的空間，有關於發電機和馬達都能利用如此的特性來做改善運用。此外，磁性亦是種能量，同樣的也可以將這樣的能量儲存起來使用，而且磁能的釋放速度亦比其它能量來的快。

<磁浮火車>

磁浮火車將是二十一世紀主要的交通工具之一，它是利用特殊合金作成的超導線圈，再利用液態氦使其降到臨界溫度以下，配合超導體的特性，控制磁場的方向與大小，可以使火車離開車道，以快速的速度(約 500 km / hr)行進，相當於

台北到高雄不需花費一小時,可與飛機做一比較,既可節省能源，效率又高。目前以日本的研究最為領先，已經進入了行車的多種測試，大約 2010 年即可上路服務大眾。

1-3 研究目的

1-3.1 樣品的改進

本實驗是在樣品的製程上有許多方式，早期是將小顆粒的超導體利用 epoxy 膠合成一塊，目前使用的方法是在熔製過程中加上晶種，長出大粒的 YBCO 樣品，大顆粒的樣品可以產生較大磁浮力。

1-3.2 溫度的影響

一般論文所提及的磁浮力量測多半在液態氮(77K)溫度下進行，本實驗因有完整的低溫系統，加上裝備有液態氮的壓縮機，所以可以將溫度控制在 T_c 以下，我們用了七種溫度(40K、50K、60K、70K、77K、85K、90K 等)來進行實驗，目的希望找出溫度對磁浮力的影響。

1-3.3 與 SQUID 磁化率量測之比較

我們將實驗所之數據帶入程式中計算，藉著各參數的設定改變，觀察磁浮力圖形的影響，從中可以推論出不同環境下超導體磁浮力的改變。然後利用 SQUID 的實驗數據，可以更明確比較出磁浮力與磁化率之間的關係，進而增加此模擬的理論基礎。

第二章 樣品的製作與儀器

本實驗利用傳統的高溫燒結法來燒製超導樣品^{[6][7]}，而我們希望所燒結成的 Ceramic 其內每一 Grain 越大越好，將 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ 加以莫耳百分比為四十的 $\text{Y}_2\text{Ba}_1\text{Cu}_1\text{O}_5$ 為助溶劑，混合均勻再燒結，燒結之前在樣品上置放已經燒結好的 $\text{SmBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ 作為晶種，將降溫的速度變慢直到可以長晶的條件，最後再進行補氧過程，實驗結果發現：我們可以得到顆粒大而且磁浮力較好的塊材。

2-1 晶種的製作

21.1 $\text{SmBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ 的製作

A. 配粉

首先將 Sm_2O_3 (Sm_2O_3 99.99%)、碳酸鋇 (BaCO_3 99.99%) 和氧化銅 (CuO 99.999%) 三種粉末在電子天秤上依重量比量取好，使其莫耳數比 $\text{Sm}:\text{Ba}:\text{Cu} = 1:2:3$ ，混合後在研磨機內研磨，使這三種粉末能夠均勻混合，以利其可以完全反應，約 50 分鐘後取出混合均勻之灰色粉末。

B. 預燒 (需三次)

將 Sm_2O_3 、 BaCO_3 、 CuO 之混合粉末以粉末的形態來進行預燒，放置在氧化鋁瓷舟上，送進高溫爐內開始加熱預燒，預燒條件如下，利用微電腦控制升溫流程至 850°C ，持溫 8 小時，爐門關閉自然降溫冷卻後取出。

將第一次預燒後的混合粉末置於研鉢中充分研磨，再送入高溫爐內進行第二次預燒，其預燒條件如下，利用微電腦控制升溫流程至 900°C ，持溫 8 小時，爐門關閉自然降溫冷卻後取出。

同理，取出後置於研鉢中充分研磨，以利第三次的預燒，其預燒條件同第二次，值得注意的是，在第一次預燒的溫度採 850°C 是因為粉末在混合時實際上不是非常均勻，如果我們第一次就用 900°C 的高溫去進行預燒，部分混合不均勻的地方，會熔融成極硬的硬塊，不利於下一次的研磨和預燒。控溫程式中所使用到的溫度是理論值，和爐子中的實際溫度會有所差異，必須定期做校溫的動作，實驗的經驗中發現，利用不同大小或材質的承載鉢燒結，或是燒結不同大小的塊材時，在溫度上都需要做些許的調整。另一方面，因長晶時的降溫速率會影響結晶品質，我們盡量把實驗室的室溫控制固定，季節交替時必須對程式中的參數做修正。

預燒條件整理

Sm123 (1st) $850^\circ\text{C} \rightarrow$ (2nd) $900^\circ\text{C} \rightarrow$ (3rd) 900°C

2-1.2 $\text{Sm}_2\text{Ba}_1\text{Cu}_1\text{O}_{5-\delta}$ 的製作

A. 配粉

首先將 Sm_2O_3 (Sm_2O_3 99.99%)、碳酸鋇 (BaCO_3 99.99%) 和氧化銅 (CuO 99.999%) 三種粉末在電子天秤上依重量比量取好,使其莫耳數比 $\text{Sm}:\text{Ba}:\text{Cu} = 2:1:1$, 混合後在研磨機內研磨,使這三種粉末能夠均勻混合,以利其可以完全反應,約 50 分鐘後取出混合均勻之灰色粉末。

B.預燒 (需三次)

將 Sm_2O_3 、 BaCO_3 、 CuO 之混合粉末以粉末的形態來進行預燒,放置在氧化鋁瓷舟上,送進高溫爐內開始加熱預燒,預燒條件如下,利用微電腦控制升溫流程至 870°C , 持溫 8 小時,爐門關閉自然降溫冷卻後取出。

將第一次預燒後的混合粉末置於研鉢中充分研磨,再送入高溫爐內進行第二次預燒,其預燒條件如下,利用微電腦控制升溫流程至 930°C , 持溫 8 小時,爐門關閉自然降溫冷卻後取出。

同理,取出後置於研鉢中充分研磨,以利第三次的預燒,其預燒條件同第二次,在 930°C 持溫 8 小時,爐門關閉自然降溫冷卻後取出。

預燒條件整理

Sm211 (1st) $870^\circ\text{C} \rightarrow$ (2nd) $930^\circ\text{C} \rightarrow$ (3rd) 930°C

2-1.3 SmBaCuO 晶種的製作

混合 $\text{SmBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ 和 $\text{Sm}_2\text{Ba}_1\text{Cu}_1\text{O}_{5-\delta}$ 稱取適當重量的 $\text{SmBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ 和 $\text{Sm}_2\text{Ba}_1\text{Cu}_1\text{O}_{5-\delta}$,使得莫耳比為 60:40,(其中 Sm211 的比例由 5% ~ 40% 皆可,以 30% ~ 40% 的效果最好,此處我們統一取用 40%。)然後放入研鉢中充分均勻混合,(此處不以研磨機研磨的主要原因有二,一是怕因研磨機研磨而損失太多的粉末,造成重量不足,二是容易造成粉末的污染。)再由壓模機壓模成直徑 2.4 cm 的餅狀樣品,將氧化鋁瓷舟倒放,再把樣品置於其背面上,再以 3mm^2 大小的 MgO 單晶片(晶格方向 100,Cubic 結構,熔點約 3000K。)置於塊材之上,以利其長晶,然後送入箱型高溫爐內進行燒結,電腦控制程序如圖(2-1),最後到室溫取出。(注意: SmBCO 燒結完成的塊材中,經常可以發現許多小孔洞,所以我們加入 CeO_2 即可減少孔洞的出現[8],以利樣品的成長。)

2-2 YBCO 大顆粒晶體的製作

22.1 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ 的製作

A.配粉

首先將 Y_2O_3 (Y_2O_3 99.99%)、碳酸鋇 (BaCO_3 99.99%) 和氧化銅 (CuO 99.999%) 三種粉末在電子天秤上依重量比量取好,使其莫耳數比 $\text{Y}:\text{Ba}:\text{Cu} = 1:2:3$, 混合後在研磨機內研磨,使這三種粉末能夠均勻混合,以利其可以完全反應,約 50 分鐘後取出混合均勻之灰色粉末。

B.預燒 (需三次)

將 Y_2O_3 、 BaCO_3 、 CuO 之混合粉末以粉末的形態來進行預燒，放置在氧化鋁瓷舟上，送進高溫爐內開始加熱預燒，預燒條件如下，利用微電腦控制升溫流程至 850°C ，持溫 8 小時，爐門關閉自然降溫冷卻後取出。

將第一次預燒後的混合粉末置於研鉢中充分研磨，再送入高溫爐內進行第二次預燒，其預燒條件如下，利用微電腦控制升溫流程至 900°C ，持溫 8 小時，爐門關閉自然降溫冷卻後取出。

預燒條件整理

Y123 (1st) 850°C \rightarrow (2nd) 900°C \rightarrow (3rd) 900°C

2-2.2 $\text{Y}_2\text{BaCuO}_{5-\delta}$ 的製作

A. 配粉

首先將 Y_2O_3 (Y_2O_3 99.99%)、碳酸鋇 (BaCO_3 99.99%) 和氧化銅 (CuO 99.999%) 三種粉末在電子天秤上依重量比量取好，使其莫耳數比 $\text{Y} : \text{Ba} : \text{Cu} = 2 : 1 : 1$ ，混合後在研磨機內研磨，使這三種粉末能夠均勻混合，以利其可以完全反應，約 50 分鐘後取出混合均勻之灰色粉末。

B.預燒 (需三次)

將 Y_2O_3 、 BaCO_3 、 CuO 之混合粉末以粉末的形態來進行預燒，放置在氧化鋁瓷舟上，送進高溫爐內開始加熱預燒，預燒條件如下，利用微電腦控制升溫流程至 850°C ，持溫 8 小時，爐門關閉自然降溫冷卻後取出。

將第一次預燒後的混合粉末置於研鉢中充分研磨，再送入高溫爐內進行第二次預燒，其預燒條件如下，利用微電腦控制升溫流程至 900°C ，持溫 8 小時，爐門關閉自然降溫冷卻後取出。

同理，取出後置於研鉢中充分研磨，以利第三次的預燒，其預燒條件同第二次，在 900°C 持溫 8 小時，爐門關閉自然降溫冷卻後取出。

預燒條件整理

Y211 (1st) 850°C \rightarrow (2nd) 900°C \rightarrow (3rd) 900°C

2-2.3 燒結與補氧

稱取適當重量的 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ 和 $\text{Y}_2\text{BaCuO}_{5-\delta}$ ，莫耳數比 60: 40(123:211) 然後放入研鉢中充分均勻混合，再由壓模機以 $400\text{kg}/\text{cm}^2$ 壓力壓模成直徑 2.4 cm 的樣品，並將 SmBaCuO 晶種置於其上，再把樣品置於倒放的氧化鋁瓷舟背面上，送入箱型高溫爐內進行燒結，電腦控溫程序如圖(2-2)，最後到室溫取出，因為氧氣在 1000°C 以上將消失殆盡，所以我們要對樣品進行補氧過程，持溫定在 490°C 達 40 小時，補氧程序如圖(2-3)，至此為樣品完成。

2-3 實驗儀器

a.電子天秤：

瑞士製的 AE-200 型，有效位數為 0.00001g，用來量測粉末重量及燒結後塊材的重量。2.瑞士製 METTER AT400 型，有效位數在 0.0001g，用來量測磁浮力的大小。

b.研磨機：

德國製 Retxch PX-600 型，主要用來混合氧化釔、氧化銅、及碳酸鋇三種粉末使其均勻，可設定研磨時間長短和調整研磨鎚下壓的力量大小。

c.壓模機：

此為本實驗室自製的儀器，主體是一個油壓式的千斤頂，最大施加壓力可達 1000KgW/cm^2 ，主要用途是把粉末壓成塊狀，可依模具的不同選擇將塊材壓成直徑 2.5 cm 或 1.26 cm。

d.管狀高溫爐：

美製 Lindberg 54459 A 型，爐管的材質為氧化鋁，主要用來燒結材料，最高溫度可加溫至 1500°C ，因為外在環境的不同，故我們設定的溫度和實際上和高溫爐的溫度可能會有差異，所以需要定期用 Thermal couple 作校溫的工作。

e.箱型高溫爐：

美製 Lindberg BF 1333C 型，內部是以高溫磚砌成內部中空的爐子，加熱時採封閉式，爐內中央有一平台可供放置樣品預燒與燒結，最高溫度可達 1500°C ，操作方式和管狀高溫爐相同，也需定期作校溫工作。

f.低速鑽石切割機：

美製 Southbay Technology 公司出品之 Model 650 型的切割機，刀片是 4 英吋，厚度是 0.12 英吋，用來切割燒結成的超導體塊材。

g.永久磁鐵：

成分為 Nd、Fe、B,離磁鐵表面最大磁場約為 0.5T。

h.高斯計：

美製 M.I. 7350 型，用來檢測磁場強度分布的情形。

i.低溫系統：

美國 RMC-Cryosystem 所製，屬封閉式循環系統，由氮氣壓縮機壓縮氮氣

至低溫腔內，藉以帶走低溫腔內的熱量，並可由溫度控制器來調節腔內的溫度。

j.高敏度數字型伏特計：

美製 KEITHLEY Model 1482 型，其最低電壓可讀至 $0.1 \mu V$ 。

k.可調式電流源：

美製 KEITHLEY Model 220 型，可輸出的電流最小值為 $1 nA$ 。

l.長焦距顯微鏡：

測量樣品與永久磁鐵相對的位置與高度，精確度在 $0.1 mm$ 。

n.自動控制垂直升降台：

為台製宏惠 08TMC-2 型步進馬達驅動微動儀，可控制上下移動速率及每一移動距離的加速速率，與伺服馬達控制器連接後，可藉由電腦控制使得每一移動的相對位置更加精確。

o.封管通氣裝置：

主要作為進氣口和排氣口，以控制氧氣的進氣量與進氣的速率。

p.抽真空機：

可將低溫系統之低溫腔內的空氣抽走，可至 $10^{-3} Torr$ 。

SmBCO123 + 211 燒結溫度表

	升溫速率 (度/小時)	目標溫度 (度)	持溫時間 (小時)
1	100	800	4
2	40	1130	0.5
3	Step	1070	0.5
4	1	980	End

圖(2-1) SmBCO123 + 211 燒結溫度表

YBCO123 + 211 燒結溫度表

	升溫速率 (度/小時)	目標溫度 (度)	持溫時間 (小時)
1	50	800	8
2	50	1045	2
3	step	1020	3
4	0.5	950	End

圖(2-2) YBCO123 + 211 燒結溫度表

YBCO123 + 211 補氧溫度表

	升溫速率 (度/小時)	目標溫度 (度)	持溫時間 (小時)
1	180	300	0
2	90	400	0
3	60	450	1
4	30	490	40
5	150	60	0
6	100	25	End

圖(2-3) YBCO123 + 211 補氧溫度表

第三章 實驗方法與步驟

3-1 系統架構

3-1.1 樣品置放

圖(3-1)是整個系統的架構,實驗一開始要先將樣品置放於銅座之上,因為要確保樣品本身的溫度與銅座相同,於是我們在接觸的地方填充銅,因為銅的黏展性與傳導性良好,所以可以加強平衡溫度的效果。要注意的是鋁管在抽了真空之後會下降大約 1mm,樣品有可能在此時受到擠壓必須預留空間確保樣品的安全。當溫度降至最低溫時(約 20k),銅座因熱脹冷縮而加大了與鋁管底部的距離約 0.4mm。

3-1.2 控溫原理

我們嘗試了許多的控溫方式,改變之前利用固定的電流源讓發熱絲發熱來控制溫度,目前所使用的方法是利用溫控器本身電流供應來控溫,設定溫控器時 GAIN(增益)=1000 ,HEATER(發熱器)=9,SET POINT(目標溫度)則能夠調整到我們所需要的溫度,通常目標溫度的值會比需要的溫度高出 10k 左右,這與 GAIN 的設定大小有關。要特別注意的是當系統溫度與目標溫度差距很大的時候,溫控器是以最大的輸出電流至發熱絲上,如果加熱的時間過久會將發熱絲燒斷,所以增溫時以階段的方式增溫較保險。

另一方面對控溫很重要的是樣品的 holder,本實驗室使用自製的銅鋁座,製作時有幾個條件必須先考慮周全,材料須是無磁性並能讓樣品離開底部低溫系統本身產生的磁場,發熱絲纏繞時需要抵銷因電流感應出的磁場且與 holder 的絕緣必須良好否則會將 sensor 燒壞,在低溫下金屬的熱脹冷縮會影響各連結部位的導熱,所以接觸以鎖死的方式為佳,否則必須將銅填補在其中減少空隙產生,在金屬傳導線材的選擇上亦需留意,以免發生干擾或電阻變化。圖(3-2)詳細繪出了這部分的相關位置圖。

3-1.3 磁場分布

實驗中是以永久磁鐵當作外加磁場,將磁鐵固定在天平的下方,藉著平台移動整個系統可以改變磁鐵至樣品之間的距離,同樣的樣品受到外加磁場的大小也就跟著改變。在實驗進行之前先將磁鐵的磁場分布量測出來,我們將磁鐵放置在微動平台上,控制平台高低便可改變磁鐵與高斯計探針的距離,測量出的磁場分布。將量測的數據與程式計算結果做一比較,如圖(3-3)。**KK, KI** 代表的是模擬磁場時可以改變的程式參數。

3-1.4 程式控制

系統的硬體方面是由一台 386 的個人電腦,使用 GPIB 介面卡和 RS-232 連接埠控制儀器,使用 GPIB 介面控制的儀器有溫控器,伏特計和電流源,使用 RS-232 介面控制的有天平和微動平台。軟體方面是由 Turbo Basic 程式語言編寫,再將 GPIB 的程式編譯在一起成為一個執行檔執行。程式當中會因實驗的目的不同而驅動不同的儀器,伏特計是較廣泛被使用到的儀器,可以跟電腦程式結合後當作溫

度計或安培計使用。例如把溫度計的溫度與電壓關係曲線以函數表示後,使用伏特計讀取溫度計的電壓,每一個數值回傳之後計算回溫度,這樣就可以在螢幕上監控溫度隨時間的變化。另外程式中的延遲時間會影響到數據的可信度,在平台移動的開始到結束所需要的時間上,要能符合程式中的延遲否則會使系統不穩定而當機。

3-1.5 讀取數據

對於天平所讀出的數據我們以程式的流程做一個分析,因為此實驗和之前不同的地方在於使用了大顆粒的樣品,而磁浮力明顯增加了許多。以往的程式裡有一個機制,當天平讀到的平均讀數大於某一範圍時將會放棄此讀數,在同一個位置下繼續讀取,這樣的一個機制容易造成有些位置停留的時間過久而失真,之前的論文有提及到磁浮力與時間的關係,解釋超導體的磁束蠕變(creep)的現象,為了避免這現象的發生而無法測量到同樣條件下的數據,便把這個機制取消。本實驗的讀取方式是每一個距離都等天平回傳讀數平均後紀錄,共做五次。圖(3-4)是固定一個溫度下每一個距離讀取五次磁浮力值的數據。

3-2 實驗流程

3-2.1 真空

當所有的儀器都設定妥當之後接下來進行的就是讓儀器開始工作,真空是實驗的第一個步驟,關上系統與外界的氣閥,打開低溫腔的氣閥開始抽真空,系統的氣壓計可以看出目前系統內的真空度,抽真空的時間大約 20-30 分鐘,要注意的是真空機的電源勿使用不斷電系統的插座,以免負載過大損壞儀器。

3-2.2 降溫

啟動低溫系統的壓縮機之前,一定要確定系統的冷卻水已經開啓,降溫的過程中觀察兩顆溫度計的溫差(一顆在銅座的上方,另一顆在下方),此時所用的電腦程式為同時監控兩顆溫度計,如果溫差過大有兩個較可能的原因,一是真空度有問題檢查是否有漏氣,或是真空機油倒流至低溫腔內部,另一個原因是銅座與低溫系統的冷頭接觸不夠良好造成溫度傳導上問題。

3-2.3 控溫

溫控器會在溫度低於設定溫度時將電流輸入發熱絲上轉為熱能,爲了要知道系統溫度是否已經達到平衡,改變所執行的電腦程式觀察電流與溫度的震盪直到震盪消失爲止,如果平衡溫度大於或小於需要的溫度便將 SET POINT 的值增加或減少同樣的溫差值,調整到所需的平衡溫時,將 SET POINT 值紀錄下來以方便下次控溫時使用。

3-2.4 量測距離

在啓動測量磁浮力程式之前,我們必須知道磁鐵與樣品之間的距離,平台在整個實驗過程中除了磁力的影響之下不能有任何外力介入,當磁鐵慢慢接近鋁管底部,接觸的瞬間天平的讀數會有明顯改變,所以在降溫之前就需要把平台的這個位置固定下來,剩下來的距離可以利用長焦距顯微鏡來觀測。

3-2.5 啓動程式

當程式起動前要先決定一個去回的距離,本實驗是以 50mm 作為操作距離,在 50-10mm 之間磁鐵以每次 2mm 接近或離開樣品讀取數據,10mm 以內則以 1mm 讀取一次,當然以可以更改以上的設定,平台的一次最小移動距離為 1/400mm。每次做完一個流程之後,利用長焦距顯微鏡確定平台回到原來的位置,確保距離沒有變動。

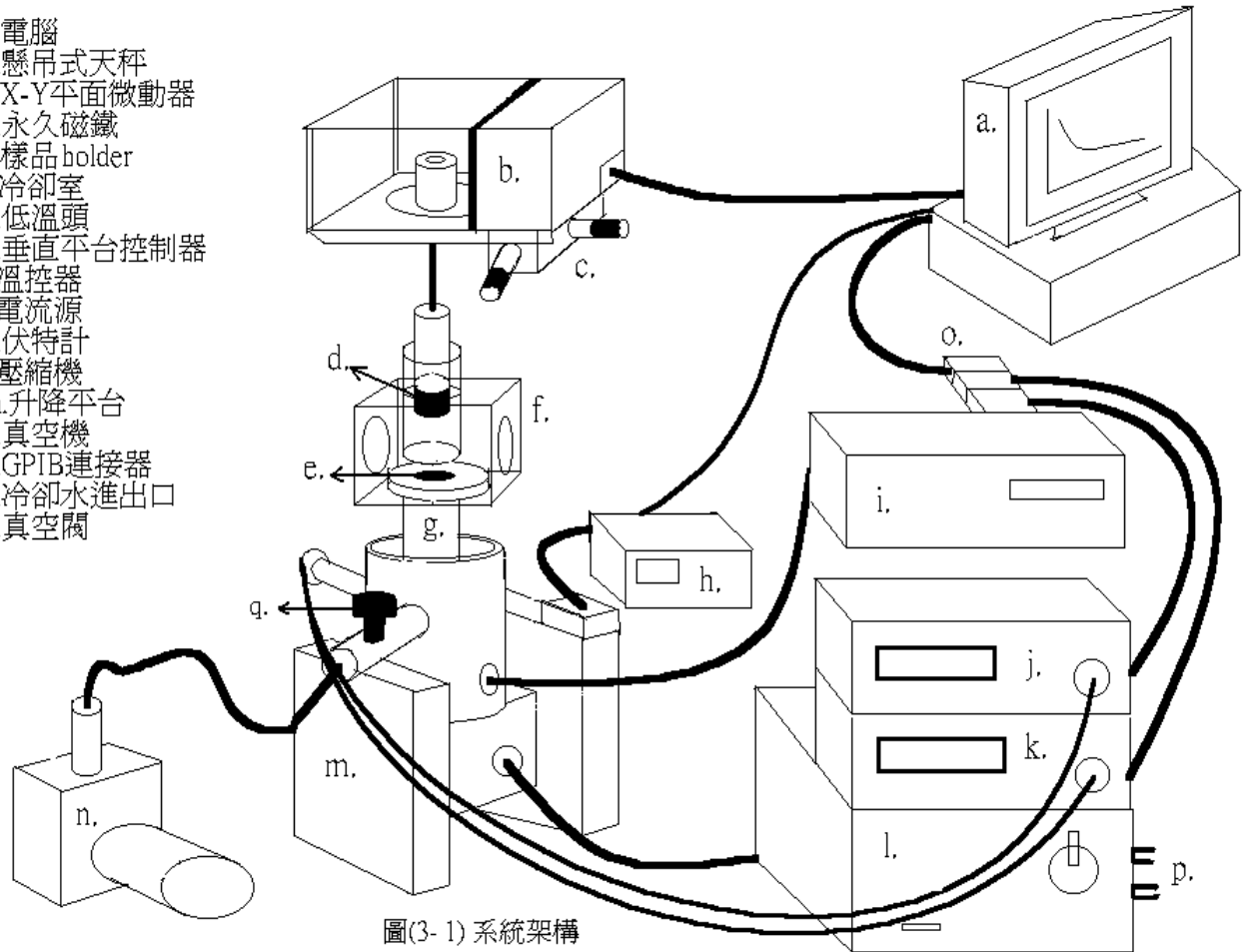
3-2.6 回溫

爲了要使實驗是在零場冷(ZFC)之下進行,做完一個溫度之後要將系統回升到 T_c 溫度以上,而且磁鐵要遠離樣品之後才能開始降溫。回溫時可以將壓縮機關閉增加回溫的速率,但冷卻水不能立刻關上,因壓縮機內部溫度依然很高。

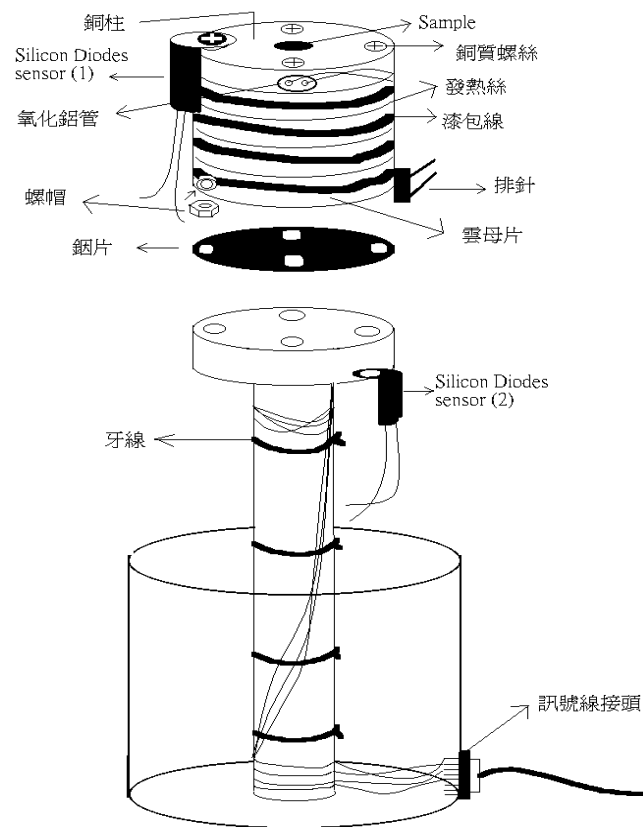
3-2.7 關閉系統

做完整個流程七個溫度的量測大約時需六個小時,關閉系統時需注意到以下幾點:低溫腔的氣閥先行鎖上一但常溫下的空氣進入腔內,對系統的損傷非常大空氣中水分進入後會結霜便無法抽真空降溫。對外界的氣閥需打開,否則真空機油會因氣壓差進入管中,當低溫腔洩真空時便會將油吸入腔內。冷卻水過三分鐘後關閉,以免浪費水資源。

- a. 電腦
- b. 懸吊式天秤
- c. X-Y平面微動器
- d. 永久磁鐵
- e. 樣品holder
- f. 冷卻室
- g. 低溫頭
- h. 垂直平台控制器
- i. 溫控器
- j. 電流源
- k. 伏特計
- l. 壓縮機
- m. 升降平台
- n. 真空機
- o. GPIB連接器
- p. 冷卻水進出口
- q. 真空閥



圖(3-1) 系統架構



圖(3-2)

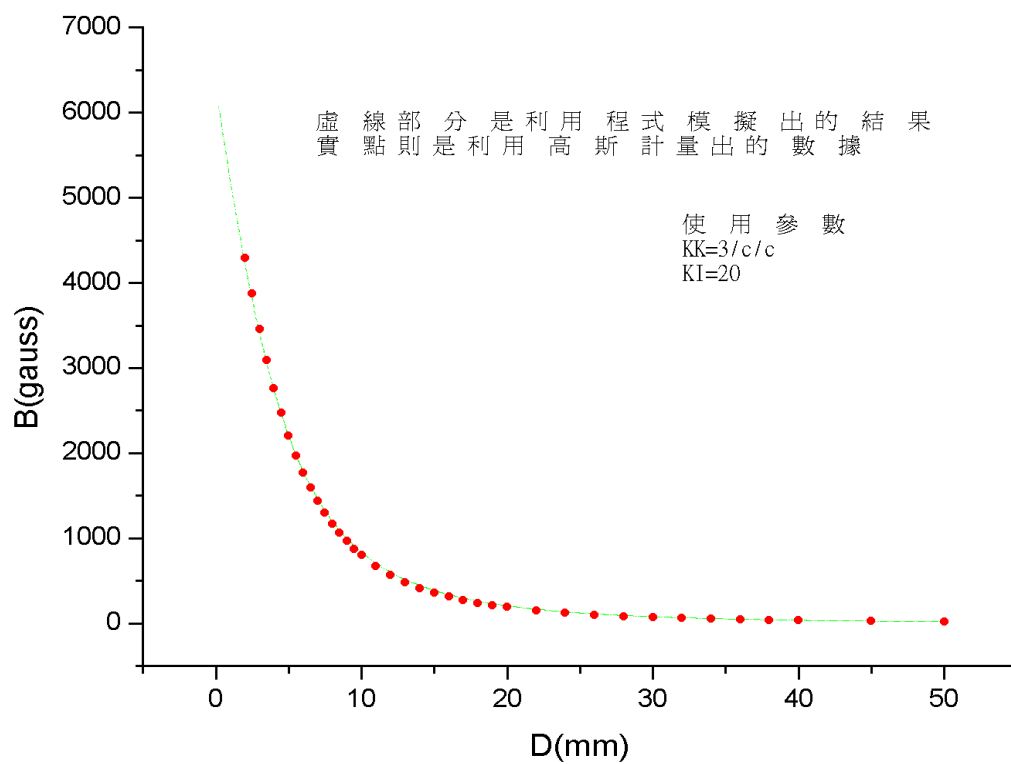


圖 (3-3)

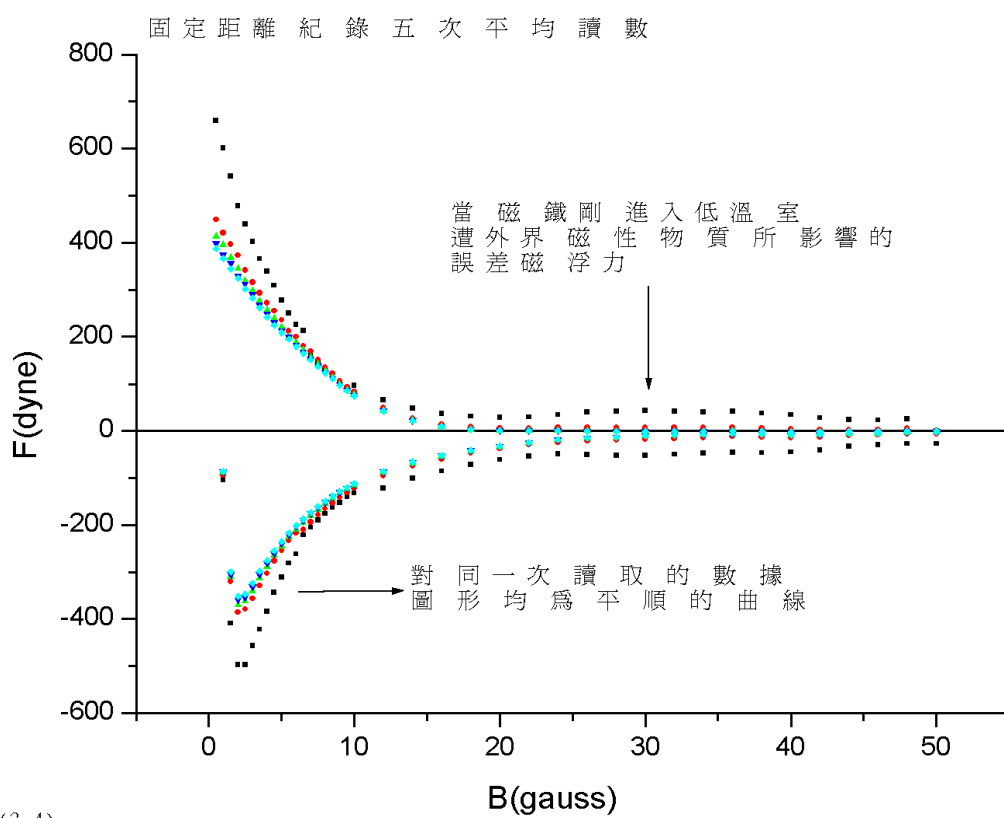


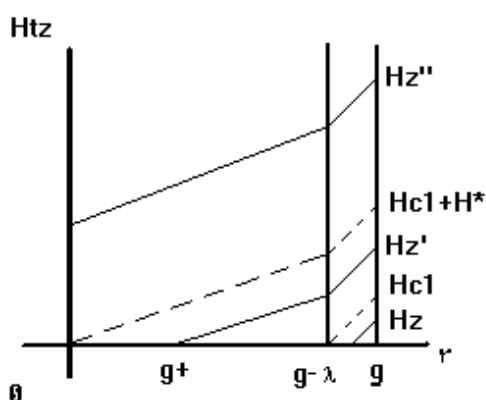
圖 (3-4)

第四章 實驗理論

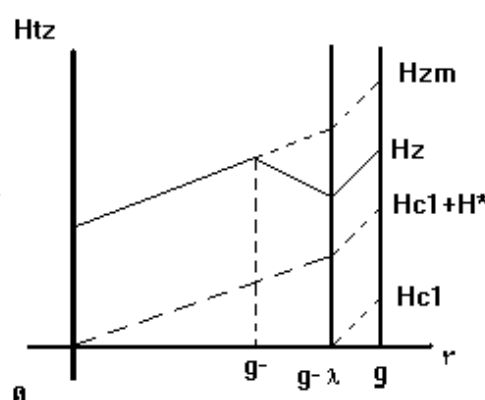
4-1 磁浮力的計算

4-1.1 基本原理

基本上在永久磁鐵與超導體之間所產生的力是相當複雜的,超導體產生不同性質的力是隨著外加磁場的變化而發生,就如前言所提到當磁場小於 H_{c1} 時也就是磁力線尚未進入穿透深度以內,無論是磁場增加或減少都以 Meissner 效應來計算,但是當磁場大於 H_{c1} 時在計算上就複雜許多,此時需考慮到 Lorentz 力與釘扎力(flux pinning force)的相互作用,計算時必須將磁場增加和磁場減小做分別的討論。為了方便了解與計算上的實用,可利用樣品的圖像來解釋力的改變,如圖(4-1),(4-2)所示。



圖(4-1)



圖(4-2)

圖中H代表Z軸上磁場的大小,r為平行於於樣品的表面的方向,g為樣品半徑,\lambda為樣品的穿透深度, H_{c1} 為臨界磁場, H^* 為磁場完全進入樣品時的值.圖(4-1)為磁場漸增時在樣品內的分布, H_z, H_z', H_z'' 代表各種不同外加磁場大小分布情形,圖(4-2)則是磁場漸減的情況。

磁浮力的表示式^[8]:

$$F_z = -\pi \left(\int_0^R r^2 j_\phi dr \right) [t (dB_z / dz)_{r=0, z=0}] \quad (1)$$

F_z 代表 z 軸方向的磁浮力, B_z 代表 z 軸方向的外加磁場, r 代表樣品的半徑, t 代表樣品厚度, j_ϕ 代表樣品內的臨界電流密度, 式(1)之中明顯看出要計算力的大小必須先找出 j_ϕ 和磁場在 Z 軸上的微分函數, 然而我們所使用的圖像中電流密度相當於磁場的斜率, 剛好可以解釋 j_ϕ 值的變化情形, 利用這理論來計算磁浮力的大小。

4-1.2 磁場與樣品計算原理

爲了計算上的方便我們做了一些假定,在外加磁場方面也就是永久磁鐵所產生的磁場,因爲磁場分布很難利用一個函數表示,所以需要利用電腦的計算模擬。首先我們將磁鐵本身視爲一個一個的線圈疊加起來,而磁鐵產生的磁場利用線圈中流通的電流來感應出等當的磁場,再將每一個線圈所感應出的磁場積分,即是模擬出的磁場分布。同時在樣品方面也是將樣品視爲圓餅的形狀,置放於磁鐵中心的正下方,爲了要忽略與 Z 軸垂直方向的計算,必須將磁鐵半徑視爲遠大於樣品的半徑大小。

4-1.3 程式計算方式

在做計算之前必須將程式中的參數設定妥當,其中各參數所代表的意義可參照附錄(A),磁鐵的磁場分布部分由 KI, KK 來決定,電腦所模擬出來的分布必須與實際量測值非常吻合以免造成計算上的誤差。首先取一組在不同溫度下所量測到的磁浮力數據當爲樣本,將每一個溫度的最大磁浮力紀錄下來作爲每次模擬的依據,第一個要決定的參數是 H₀(磁鐵到樣品的距離),往往在這裡需要做一項修正,因爲我們是將樣品視爲一個等當的圓餅塊材,在形狀上已經做了改變距離也應隨作修改另一個會影響到距離的原因是磁鐵與鉛管之間的接觸,因爲是不可見到的所以有可能會發生誤差,誤差範圍在 0.5mm 之內。要注意的是這一個參數是改變整個圖形的最大項,必須非常仔細。在圖形模擬出來之後必須和實驗值做一比較,改變不同的 J_{c0} (最大臨界電流密度)將計算出來的磁浮力最大值,修正至與實驗值相同爲止。因爲最大值已經考慮進去所以不會有差異,但是整個圖樣的吻合還是需要做進一步的調整,在調整時 Z₁ 值(代表 H_{c1})對圖形的影響可以參考下式：

$$cH = H_{c1}(0) * (1 - (T / T_c)^2) \quad (2)$$

式中 H_{c1} 即是程式中使用的 Z₁ 值, H_{c1}(0) 代表樣品在絕對溫度零度時的 H_{c1} 值, T 代表溫度, T_c 代表樣品的臨界溫度, 整個圖樣符合實驗值之後, 將操作程式時所使用的 J₀ 紀錄下來, 此值即是我們計算出的樣品臨界電流密度 J_{c0}。

4-2 磁化率與電流密度

4-2.1 利用磁化率計算電流密度

圖(4-3)-(4-8)是我們將樣品送至國立清華大學與成功大學貴重儀器中心測量的 SQUID 數據, 一般利用磁化率計算電流密度的方式可參考下式^[9]:

$$J_c(H) = 30 * \Delta M / d \quad (3)$$

其中 J_c(H) 單位爲 A cm⁻², M 單位爲 emu cm⁻³, d 是樣品直徑單位爲 cm, 另一個

計算方式如下式:

$$J_c(H) = 4\delta \cdot 30 \cdot \Delta M / d \quad (4)$$

兩者差異在於使用不同形狀的樣品,式(3)適用在圓柱形的材料,而 d 代表的是樣品的半徑,單位則與式(2)相同,計算電流密度時需注意到,當磁場剛加入至樣品時磁化率負值會隨磁場增加而增加,此時的電流密度代表的是 Meissner 效應下所感應出來,而我們有興趣的是當磁場大到已經完全進入樣品之內的電流密度,所以在低溫之下需要更大的磁場才能計算出我們所需的電流密度值。

4-2.2 電流密度的計算方式

有關電流密度與磁場的關係有許多學者做過研究,大致上有三種方式敘述:

$$(a) J_c = k_B \quad (\text{constant}) \quad \text{Bean's models} \quad (5)$$

$$(b) J_c = k_K / (H_{0k} + H_i) \quad \text{Kim's models} \quad (6)$$

$$(c) J_c = k_E \exp(-H_i / H_{0E}) \quad \text{Exponential models} \quad (7)$$

(a)代表的是當磁場大於 H_{c1} 之後, J_c 的值便是一個常數,但是我們可以從磁化率的數據上明顯看出, J_c 會隨著磁場的加大而逐漸減小,而(b),(c)就是一個遞減函數,而我們的程式之中爲了計算方便利用了 Exponential models 的計算方式

4-3 比較磁浮力與磁化率

4-3.1 磁浮力計算出的電流密度

根據實驗數據所模擬出的磁浮力圖參數中,利用 J_{c0} 與 HH 的值可以計算出相對應於磁場的 J_c 值, HH 代表的是 Exponential models^[10]中的 H_{0E} 值,

$$J_c = J_{c0} \exp(-H_i / HH) \quad (8)$$

4-3.2 利用磁浮力計算磁化率

磁浮力與磁化率可以用下式直接表示[11]:

$$F_z = V * M * (dB / dZ) \quad (9)$$

V 爲樣品的體積, M 爲磁化率,最後一項爲外加磁場在 z 軸方向對距離微分,同時將

兩邊積分所得到的量綱都是能量,左邊即是磁浮力與距離關係圖中圖形的面積,但是右邊的部分必須做一個分析,因為磁化率其實是一個跟磁場有關的函數,如果從能量的等式出發,式(8)便是兩個能量對距離的微分式,其中右邊缺少了磁化率對距離的微分項,因為我們並不知道測量 SQUID 時磁場與距離的關係,並且磁場的外加方式也與我們的實驗不盡相同,所以基本上我們還是經由磁浮力所測量出的力圖然後利用程式計算出樣品電流密度,之後與 SQUID 測量磁化率計算出的電流密度做一個比較。

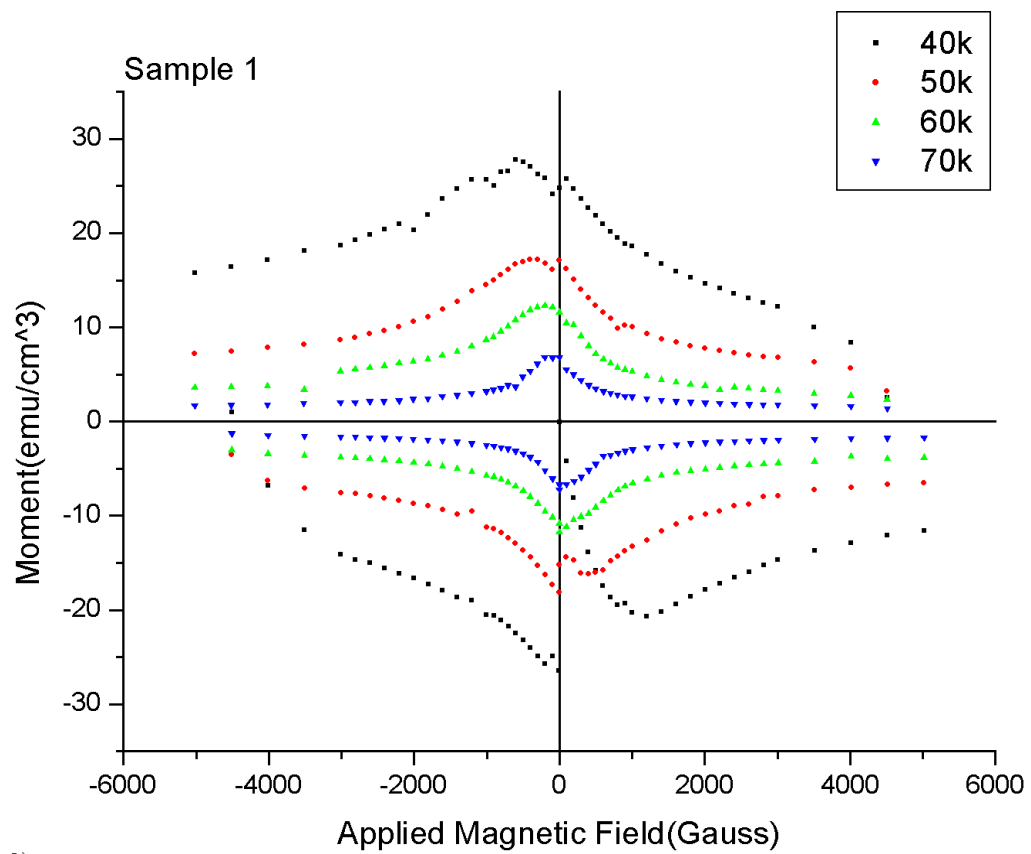


圖 (4-3)

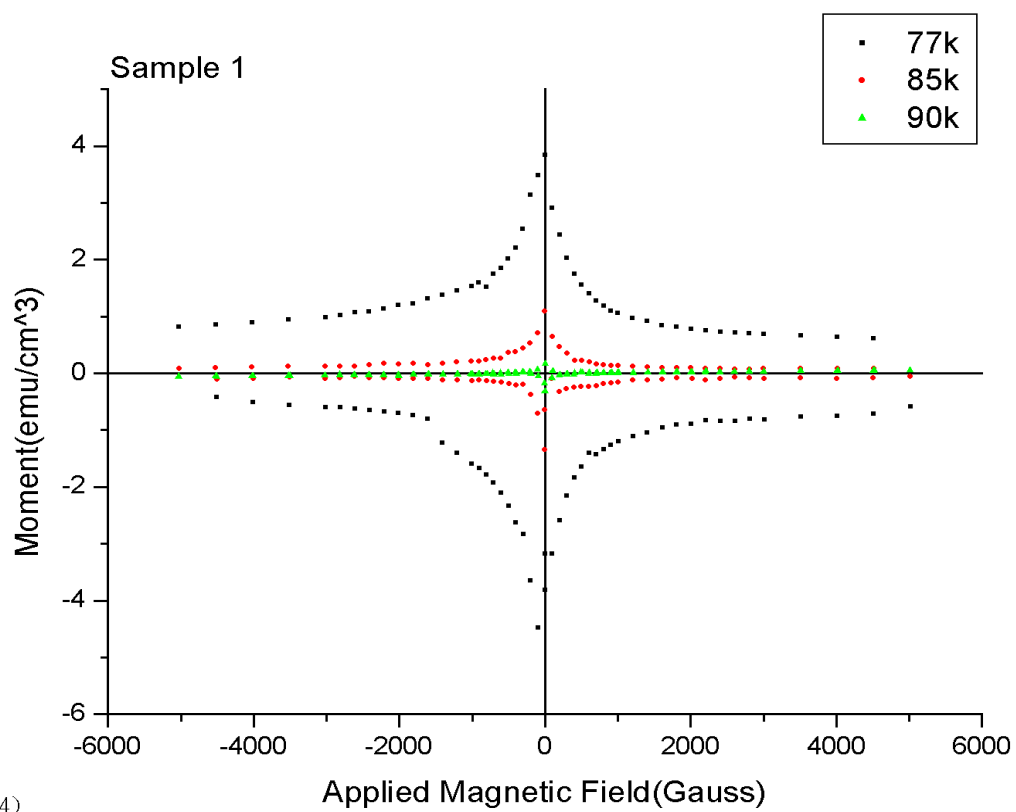


圖 (4-4)

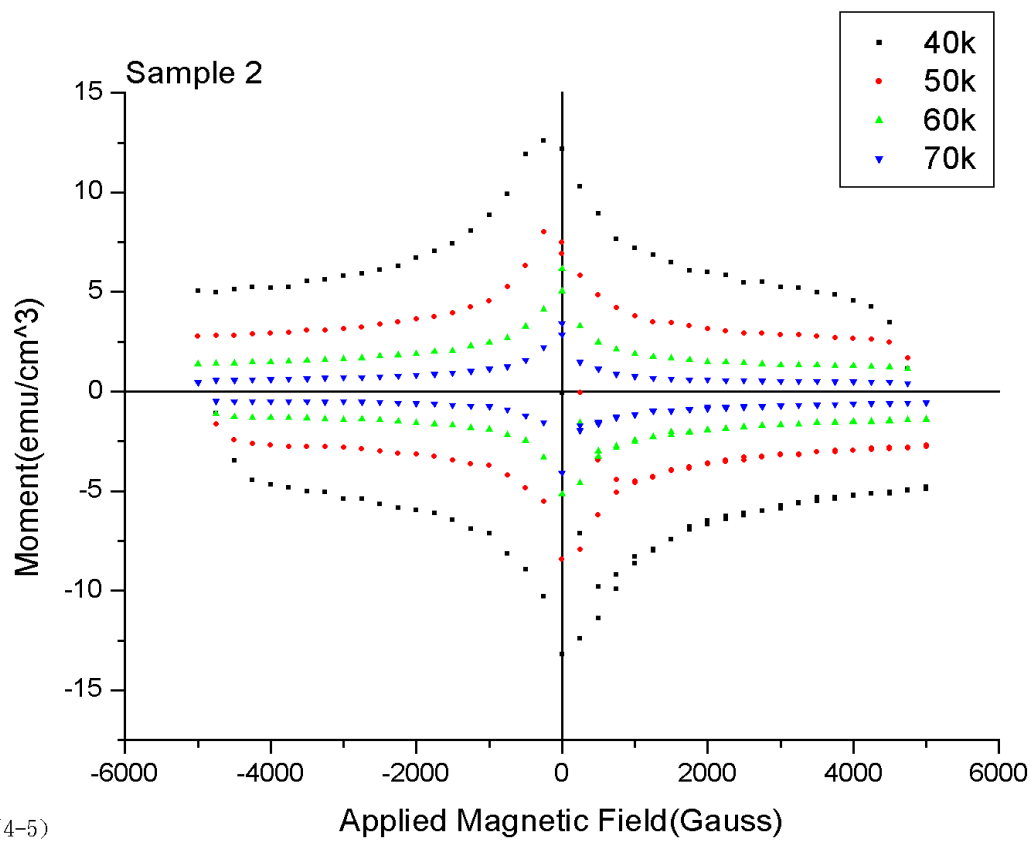


圖 (4-5)

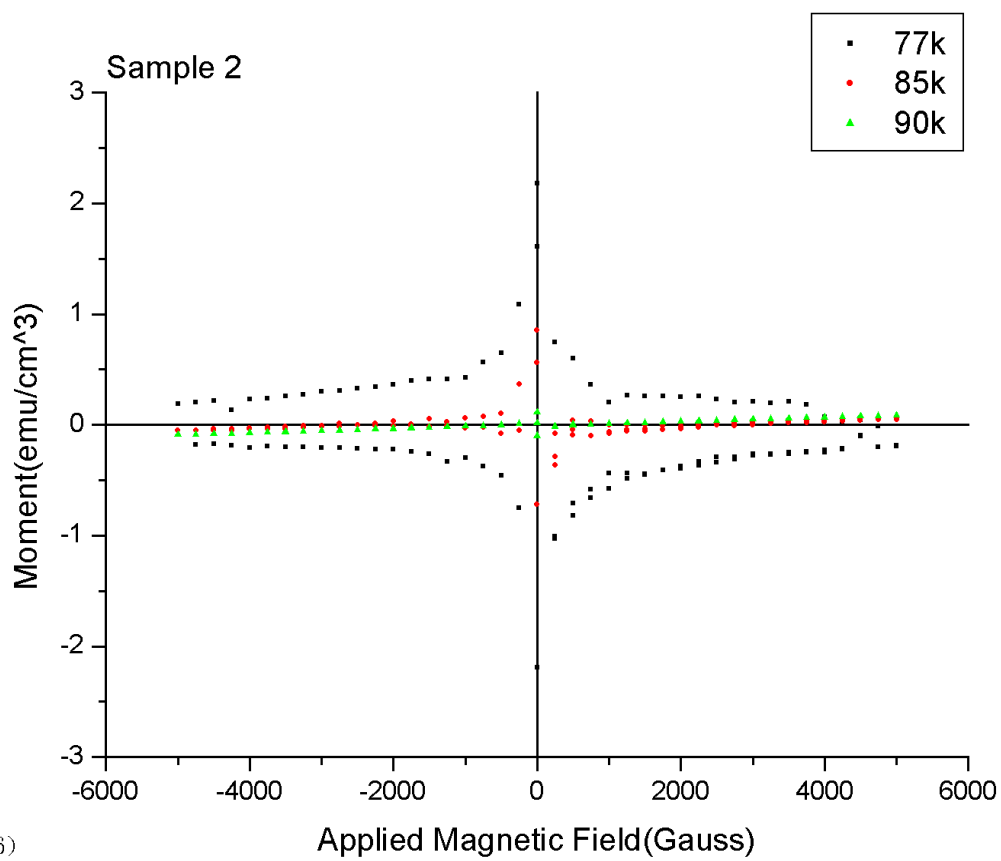


圖 (4-6)

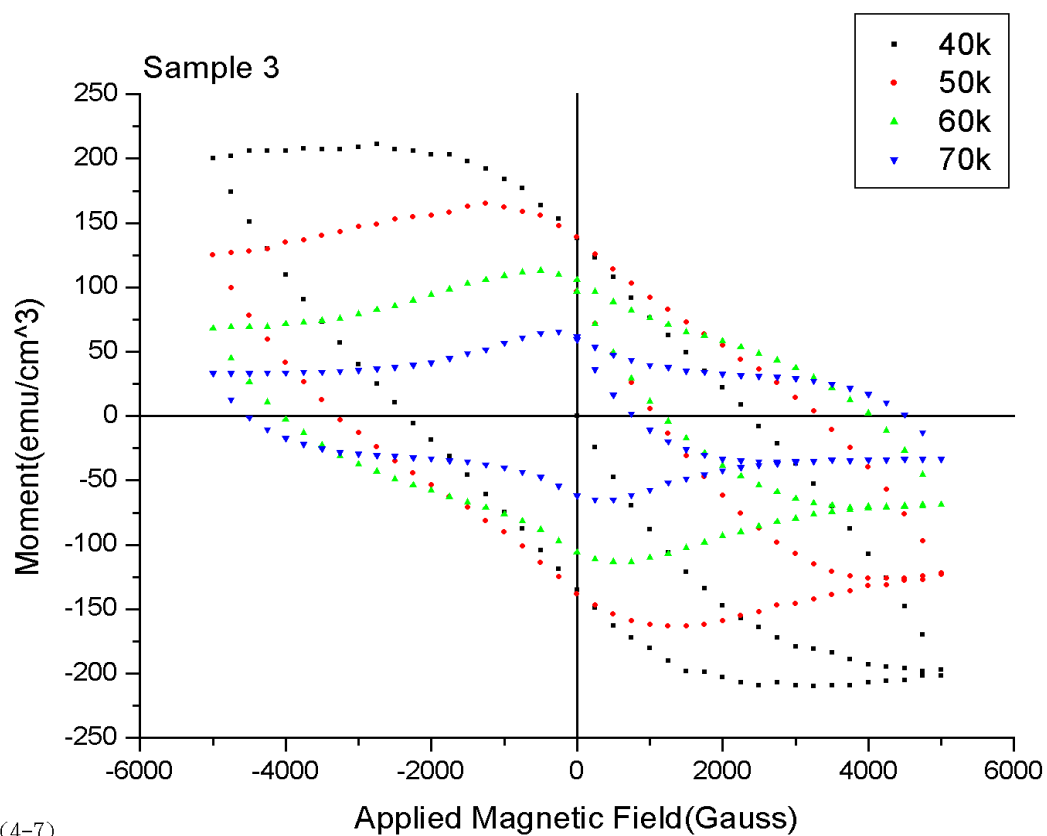


圖 (4-7)

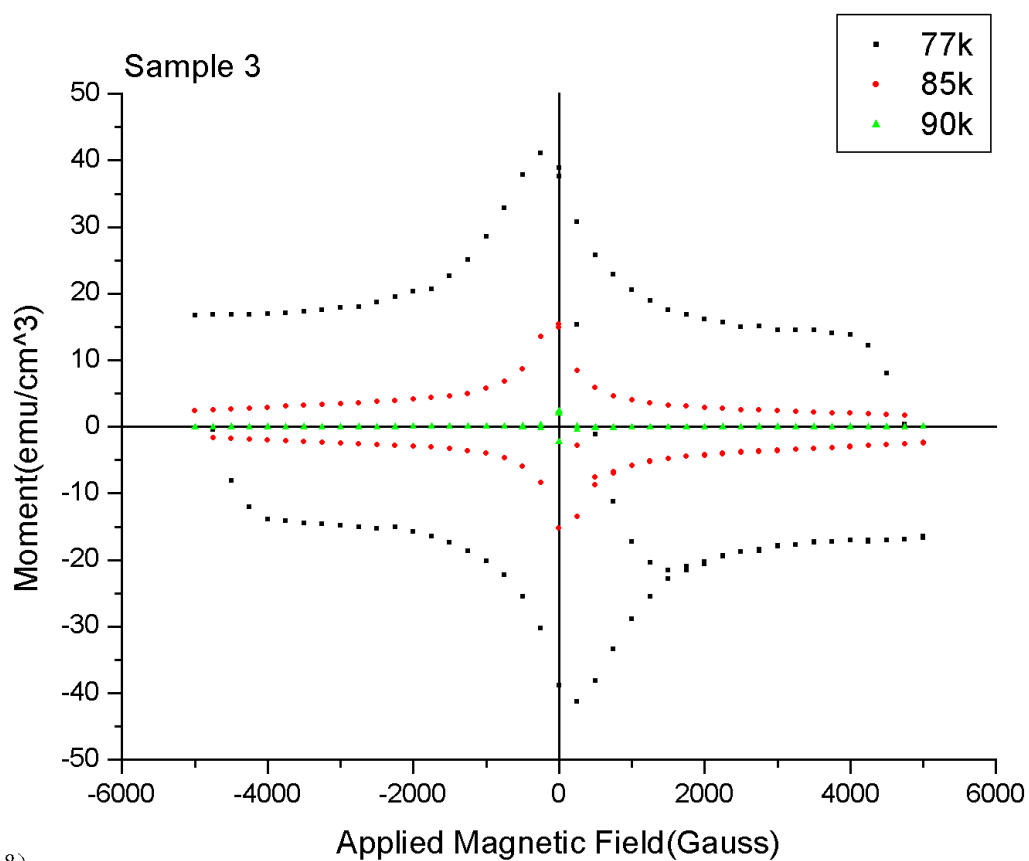


圖 (4-8)

第五章 結果與討論

5-1 磁浮力量測與模擬結果

此章節裡將測量過磁化率的三個樣品做一個整理,樣品的質量,體積,密度,,程式模擬的各參數請見表(5-1),圖(5-1)-圖(5-18)為實際量測值與模擬結果的比較圖。圖(5-19)是光學顯微鏡下拍攝的樣品外表,使用倍率 $\times 50, \times 125, \times 600$ 。圖(5-20)是樣品的粉末 X-ray 繞射圖,圖(5-21)是樣品三的塊材 X-ray 繞射圖。

5-2 磁浮力與磁化率的比較

圖(5-22)-圖(5-27)為樣品測量磁化率後計算出的 J_c 與磁場關係圖,其中還包含了利用磁浮力計算出來的電流密度,我們將兩者做一個比較。

5-3 討論

樣品一與樣品二是利用敲擊的方式取晶面完整小顆粒的塊材,而樣品三則是長出大顆粒的結晶之後利用鑽石刀切割出小顆粒的塊材。使用切割的方法可以確定樣品的方向,利用 X-ray 繞射圖可以明顯看出我們長出的樣品具有相同方向的結構,所以確定方向之後對將來的量測會更有幫助。

另一方面是以磁化率計算電流密度時應考慮到的條件,因為在計算時需先考慮到樣品本身的形狀再使用適合的計算式,所以我們必須先燒出大顆粒結晶面良好的樣品,樣品三便是從一顆大顆粒的塊材上切割下來,藉由切割的方式才能切割出相同形狀而大小不同的樣品塊材做來比較之用。

從兩者的電流密度比較圖中我們可以觀察出,在磁場較小時所計算出來的電流密度兩者差異較大,那是因為在測量磁化率剛開始時磁力線尚未進入樣品內部,此時的電流密度與利用模擬程式計算出的電流密度意義不同,而我們有興趣的電流密度應該是磁場進入樣品內部且達到飽和的時候,當溫度越低時或是樣品的 H_{c1} 值越大時,便需要較大的磁場才能達到飽和狀態,圖(4-7)我們可以看見磁化率尚未到達一個近似穩定的值,直到溫度大於 70k 時才能利用磁化率來計算電流密度,圖(5-26)的實驗結果可以明顯看出其差異性。

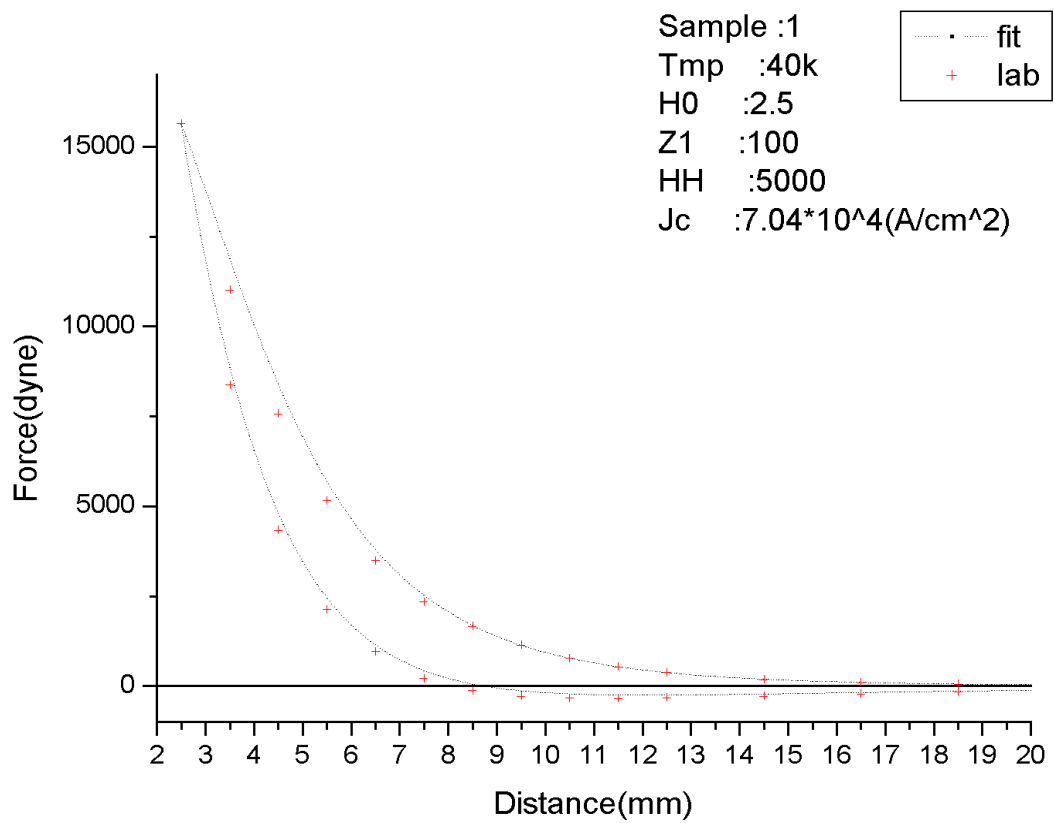
外加磁場方面,因為測量磁化率時是利用超導磁環所場生的平行磁場,與永久磁鐵的磁場分布不相同,因為我們是考慮永久磁鐵遠大於樣品的大小所以才能比較,但是如果測量大顆粒樣品時就必須克服這方面的問題。另一個在外加磁場的問題是零場冷的條件,在測量磁化率時我們也應該把零場冷的條件考慮進去以減少比較上的變因。

在模擬磁浮力方面控制磁場與電流密度關係的參數 HH ,值得我們做進一步的研究。除了理論上我們可以知道電流密度是隨磁場增加而遞減的函數之外,從

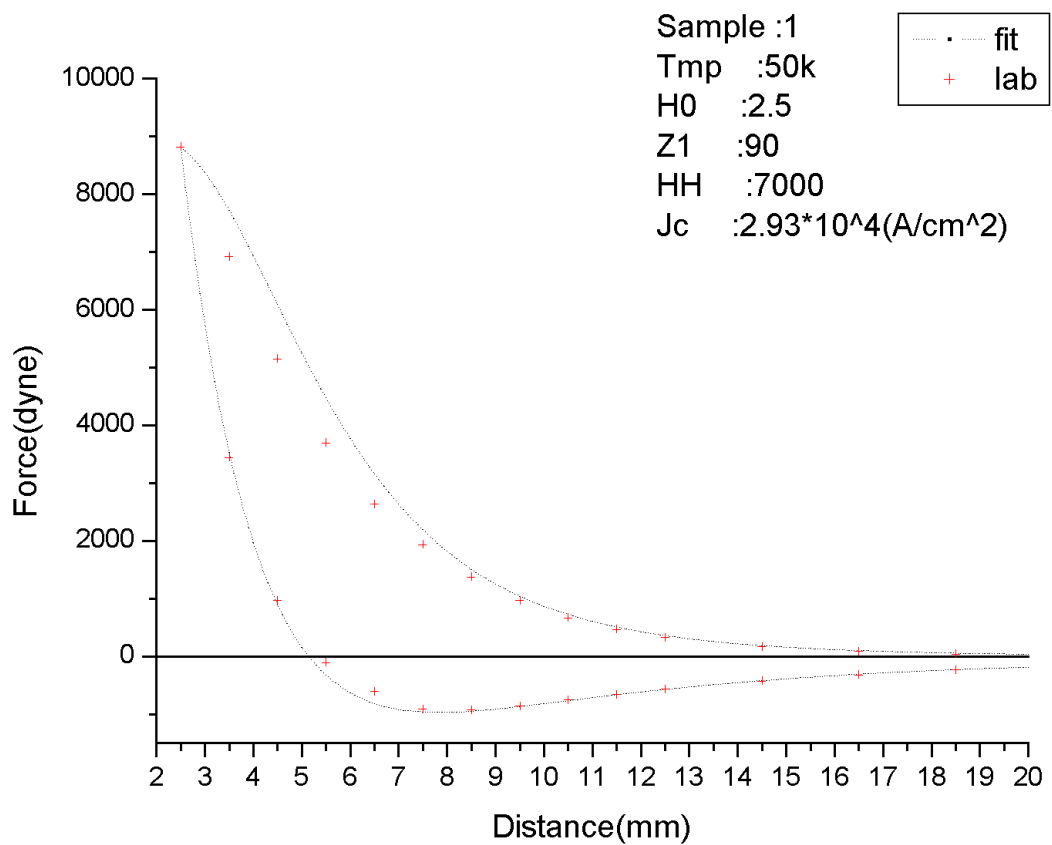
磁化率數據也可以看出磁場完全滲入樣品之後磁化率的差值便逐漸減小,但是要
知道在不同溫度下電流密度隨磁場的變化方式則需要更多的數據來分析,以目前
所觀察到的結果可以看出溫度越高電流密度遞減的比例就越小,也就是 H_H 的
值越大。如果 H_H 視為無限大的話所代表的就是 Bean's model 的理論。

表(5-1)

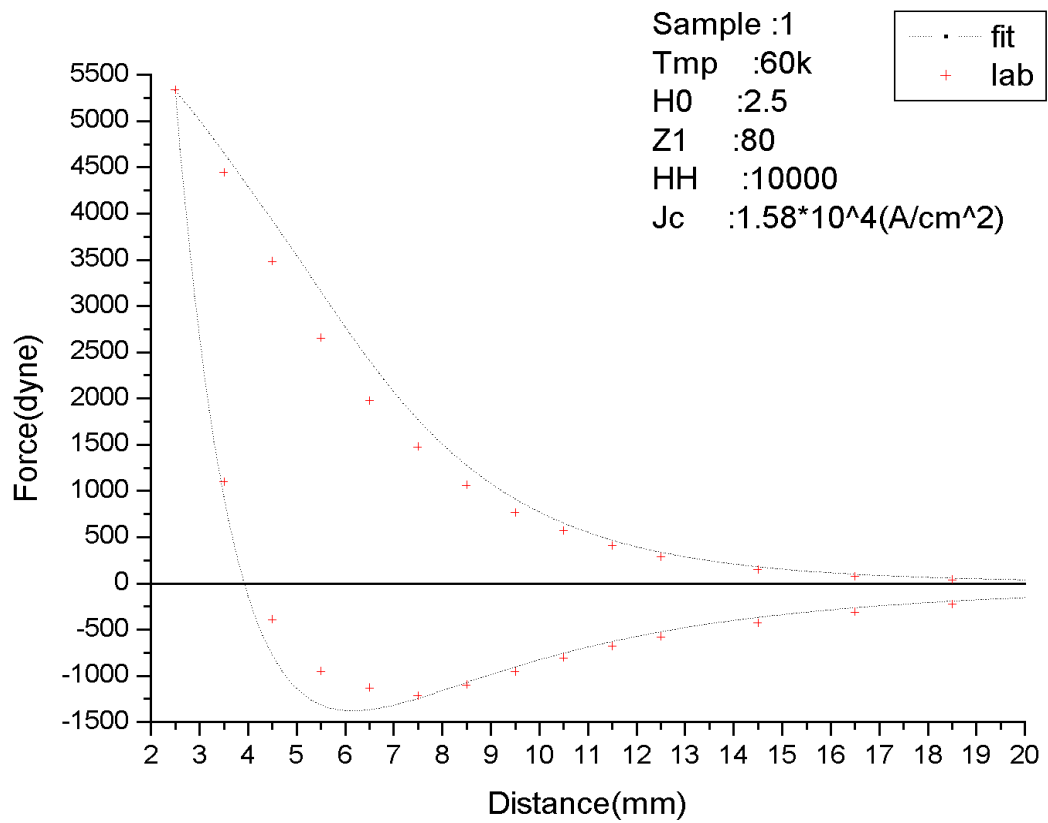
Sample1		Temp(k)	distance(mm)	Max-force(dyne)	Z1(Gauss)	HH	J0(G/m)*10 ⁴	Jc(A/cm ²)*10 ⁴
	R(cm)	40	2.5	1539	100	5000	884	7.04
	0.10	50	2.5	8821	90	7000	368	2.93
	T(cm)	60	2.5	5336	80	10000	198	1.58
	0.13	70	2.5	2682	60	10000	97	0.77
		77	2.5	1424	30	10000	53	0.42
		85	2.5	581	10	10000	23	0.18
Sample2		Temp(k)	distance(mm)	Max-force(dyne)	Z1(Gauss)	HH	J0(G/m)*10 ⁴	Jc(A/cm ²)*10 ⁴
	R(cm)	40	5.0	7571	60	4000	336	2.68
	0.21	50	5.0	5266	53	6000	181	1.44
	T(cm)	60	5.0	3824	44	8000	121	0.96
	0.10	70	5.0	1993	33	10000	61	0.49
		77	5.0	1099	25	5000	40	0.32
		85	5.0	414	10	6000	14	0.11
Sample3		Temp(k)	distance(mm)	Max-force(dyne)	Z1(Gauss)	HH	J0(G/m)*10 ⁴	Jc(A/cm ²)*10 ⁴
	R(cm)	40	4.6	16896	250	6000	1355	10.79
	0.14	50	4.6	13273	220	7000	488	3.89
	T(cm)	60	4.6	10858	180	8000	327	2.60
	0.31	70	4.6	7598	140	12000	198	1.58
		77	4.6	4482	100	16000	111	0.88
		85	4.6	2014	60	4000	71	0.57



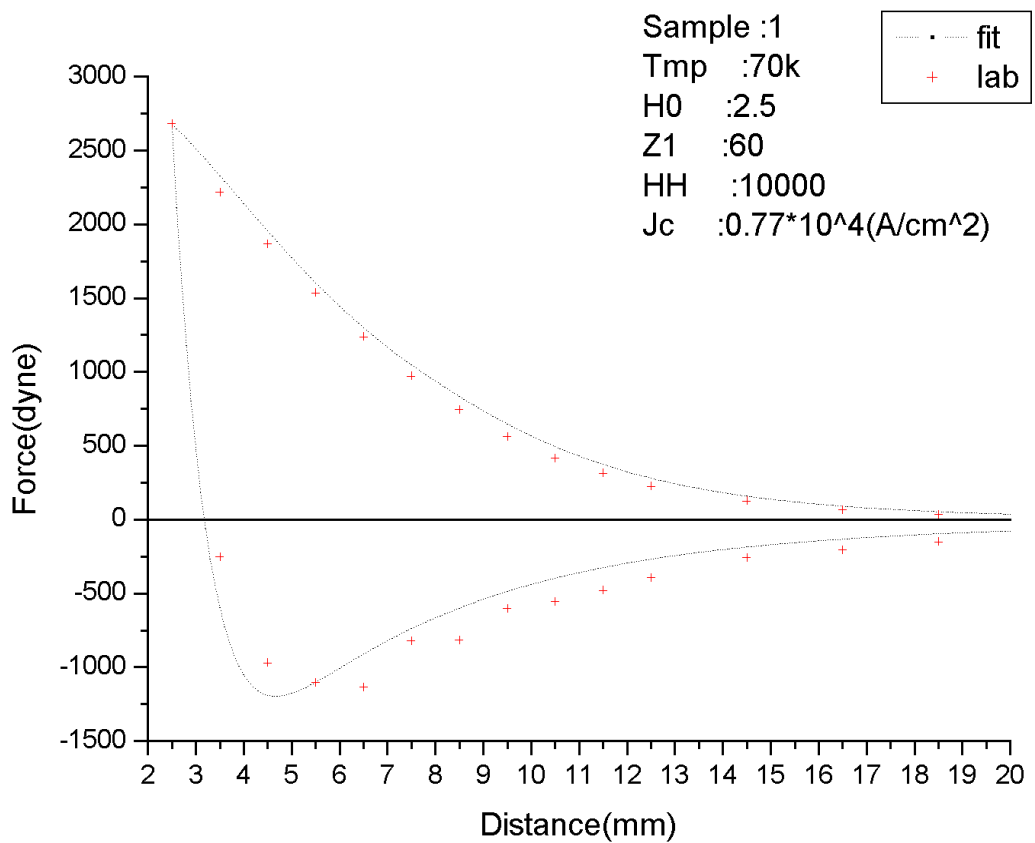
圖(5-1) 樣品一磁浮力實驗值與模擬結果比較



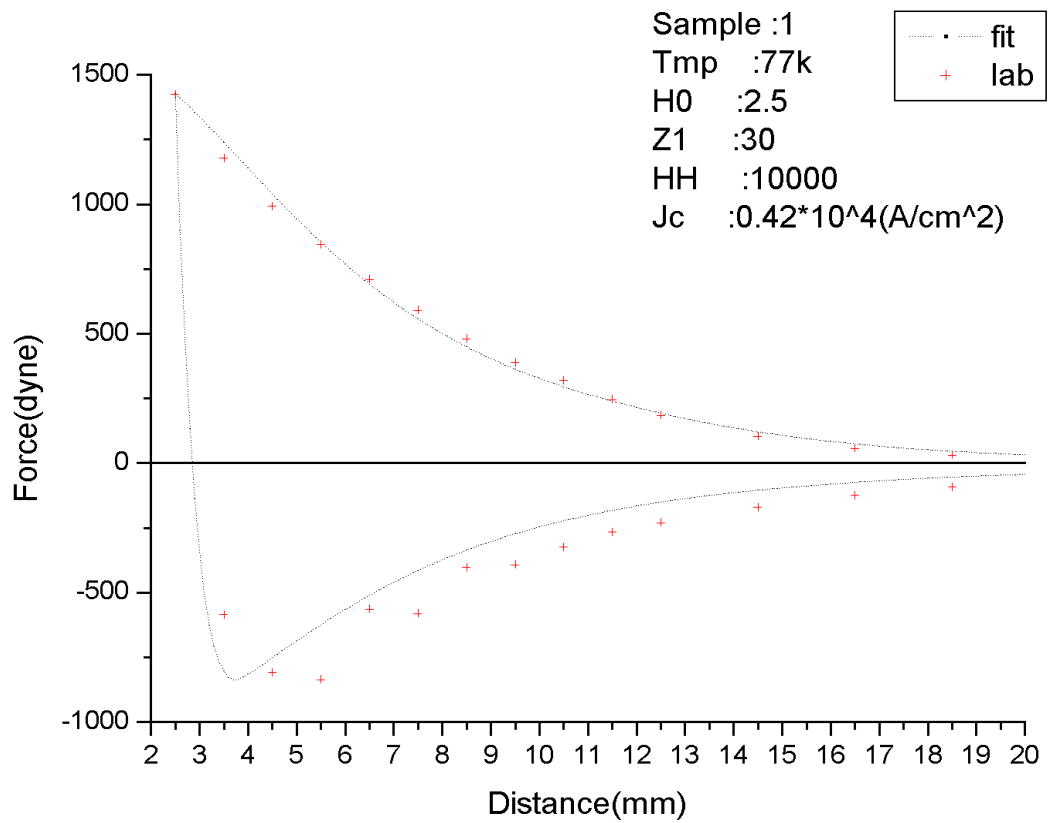
圖(5-2) 樣品一磁浮力實驗值與模擬結果比較



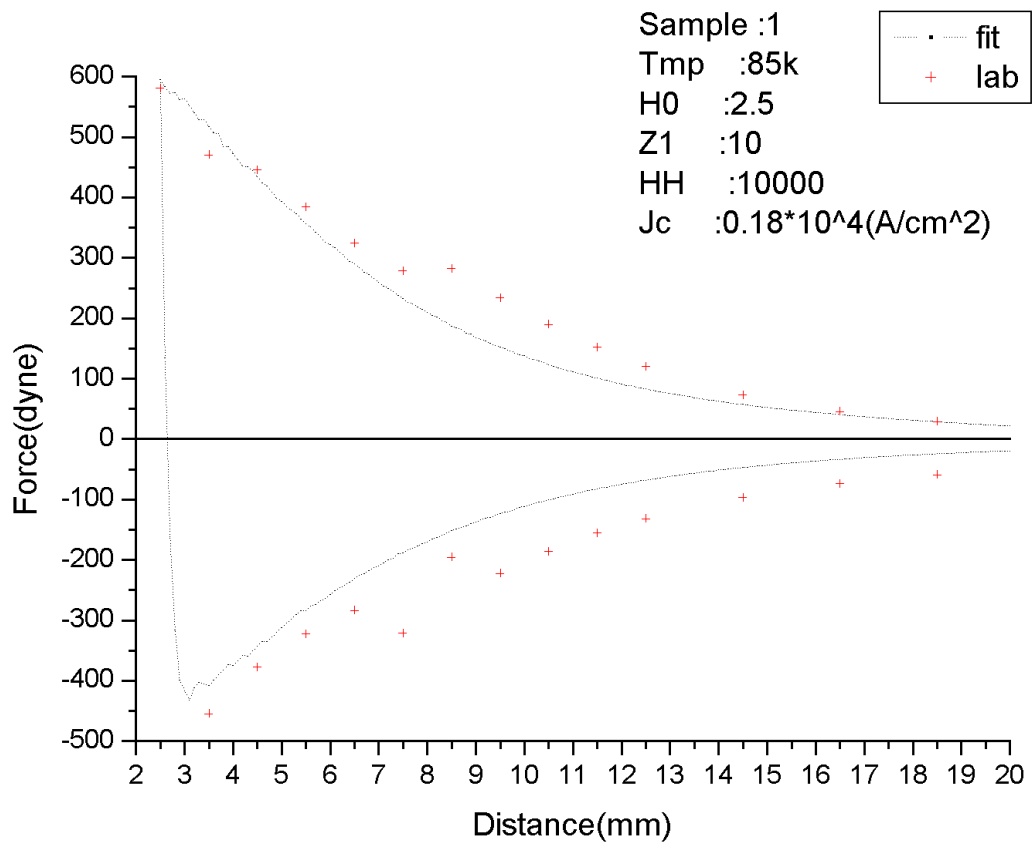
圖(5-3) 樣品一磁浮力實驗值與模擬結果比較



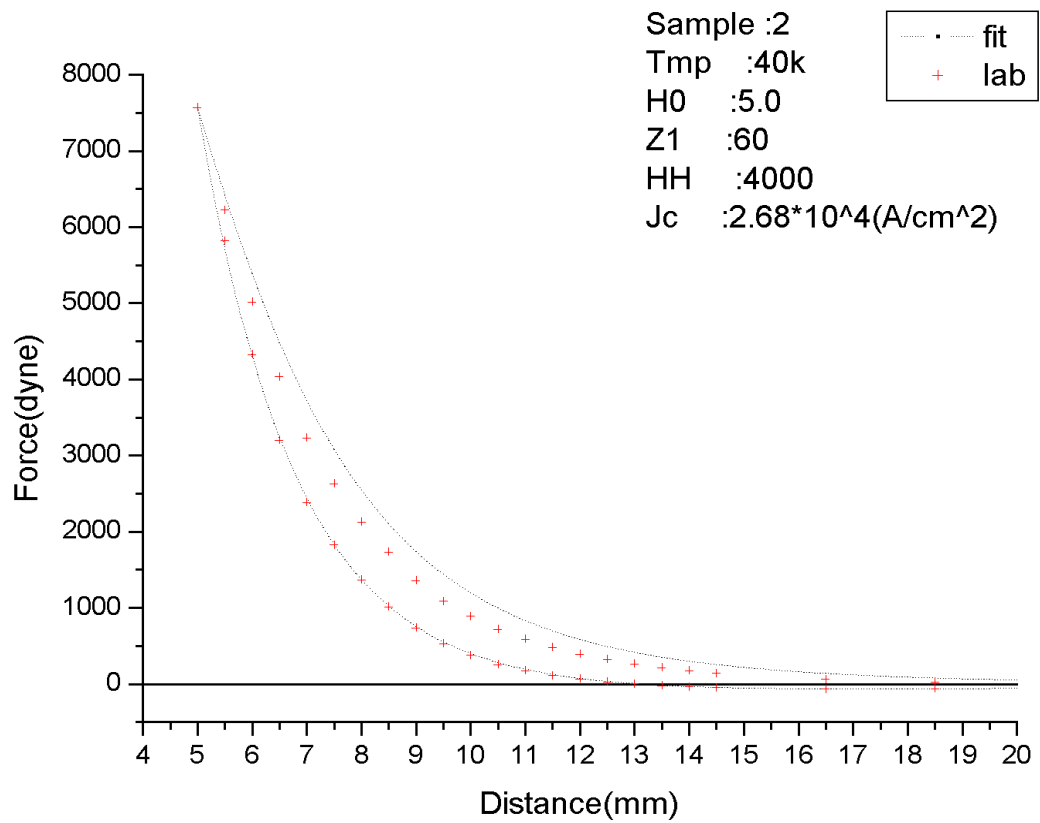
圖(5-4) 樣品一磁浮力實驗值與模擬結果比較



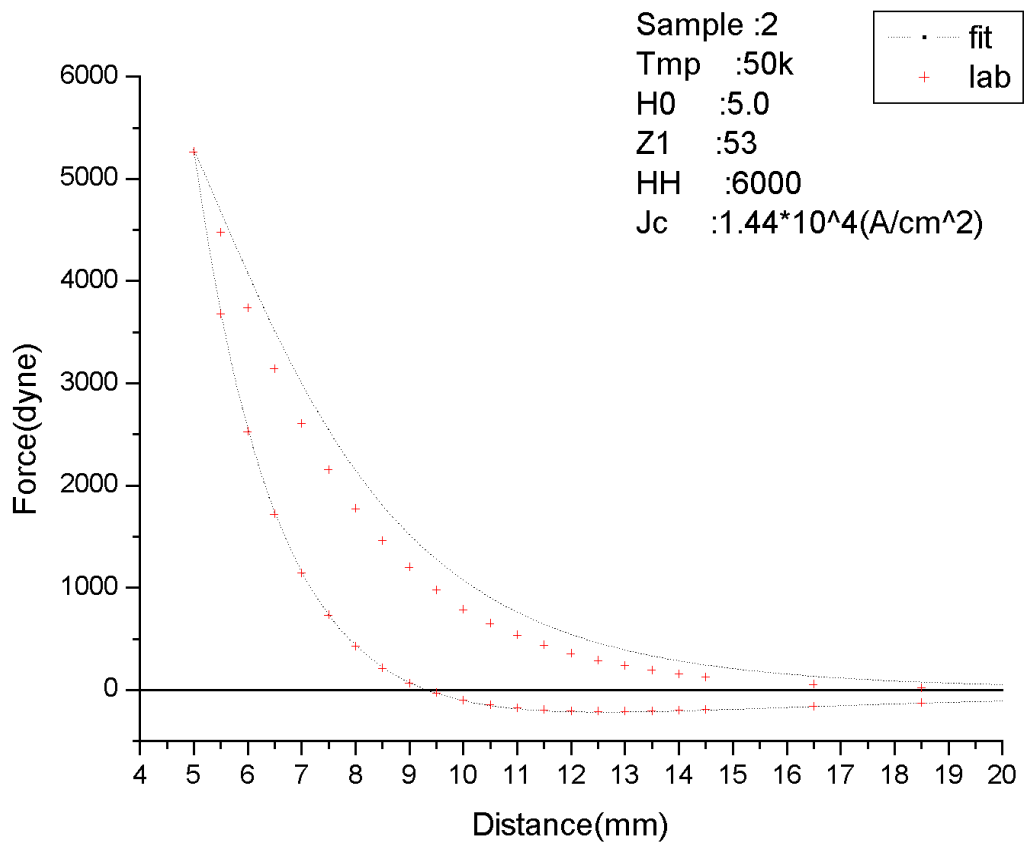
圖(5-5) 樣品一磁浮力實驗值與模擬結果比較



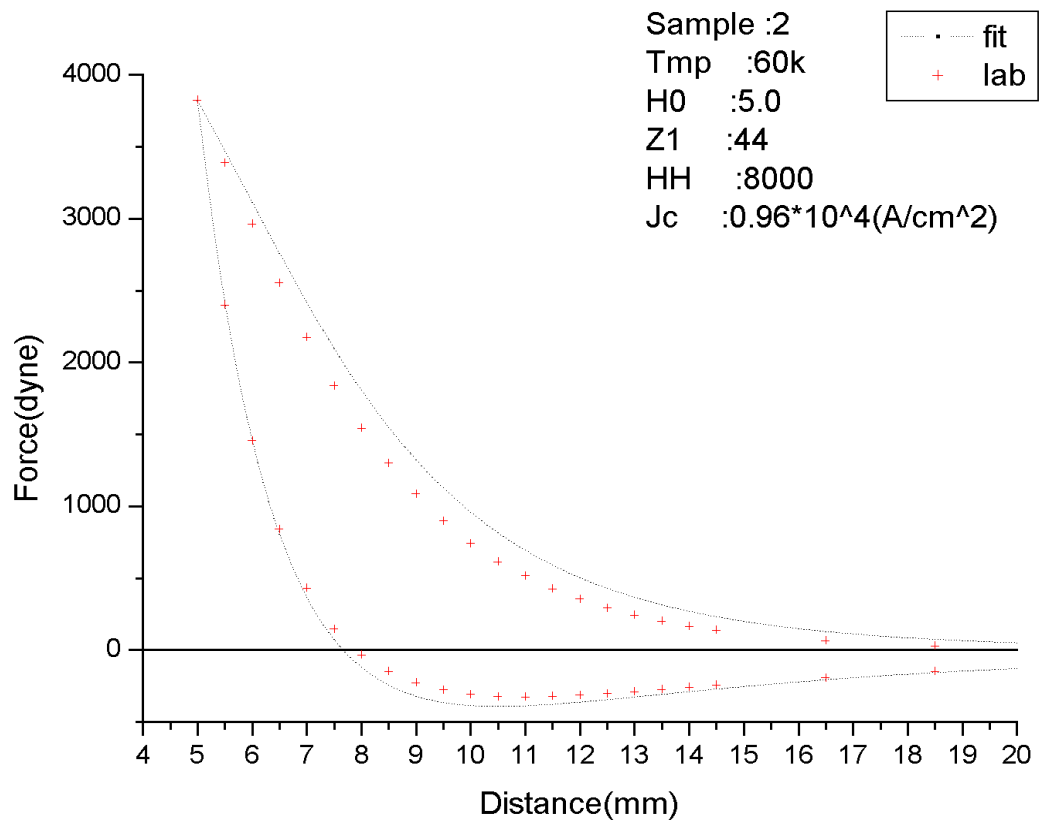
圖(5-6) 樣品一磁浮力實驗值與模擬結果比較



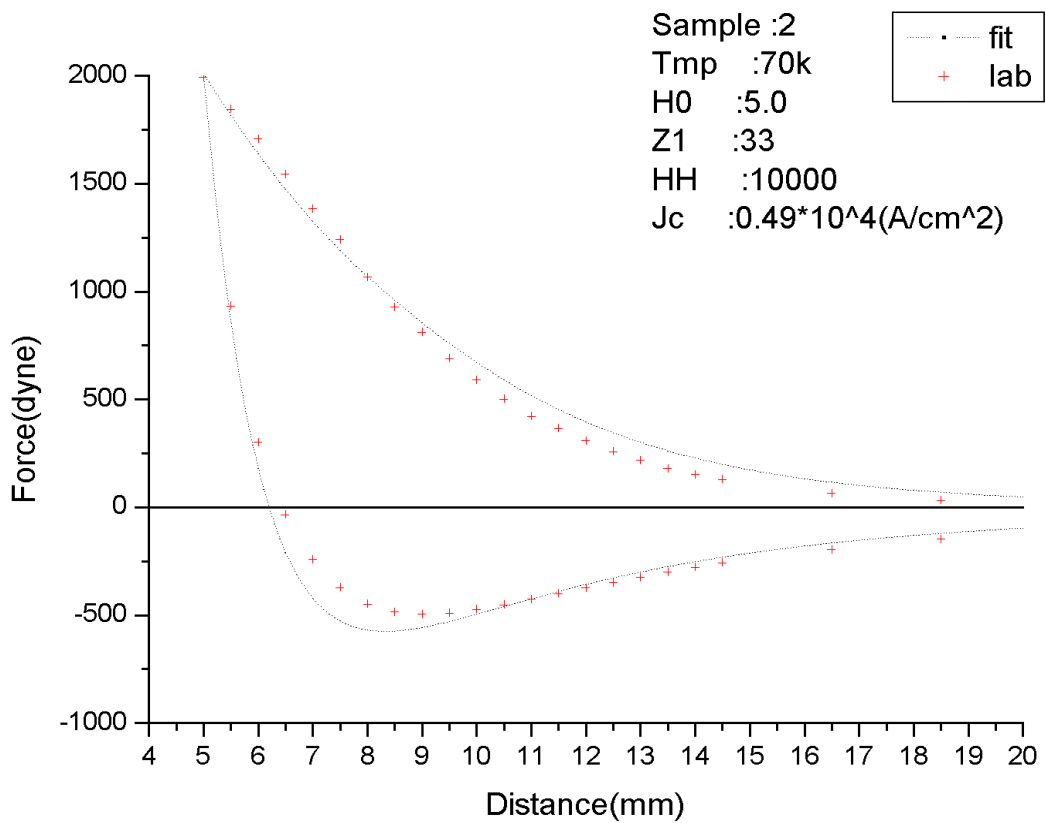
圖(5-7) 樣品二磁浮力實驗值與模擬結果比較



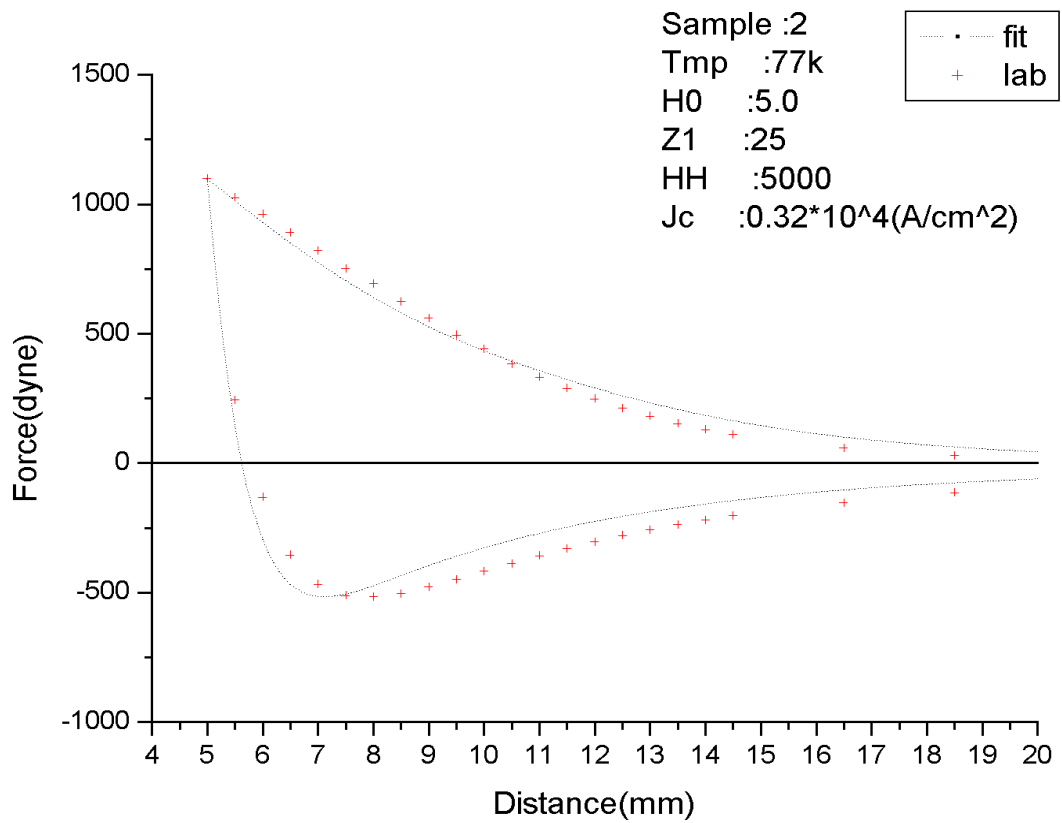
圖(5-8) 樣品二磁浮力實驗值與模擬結果比較



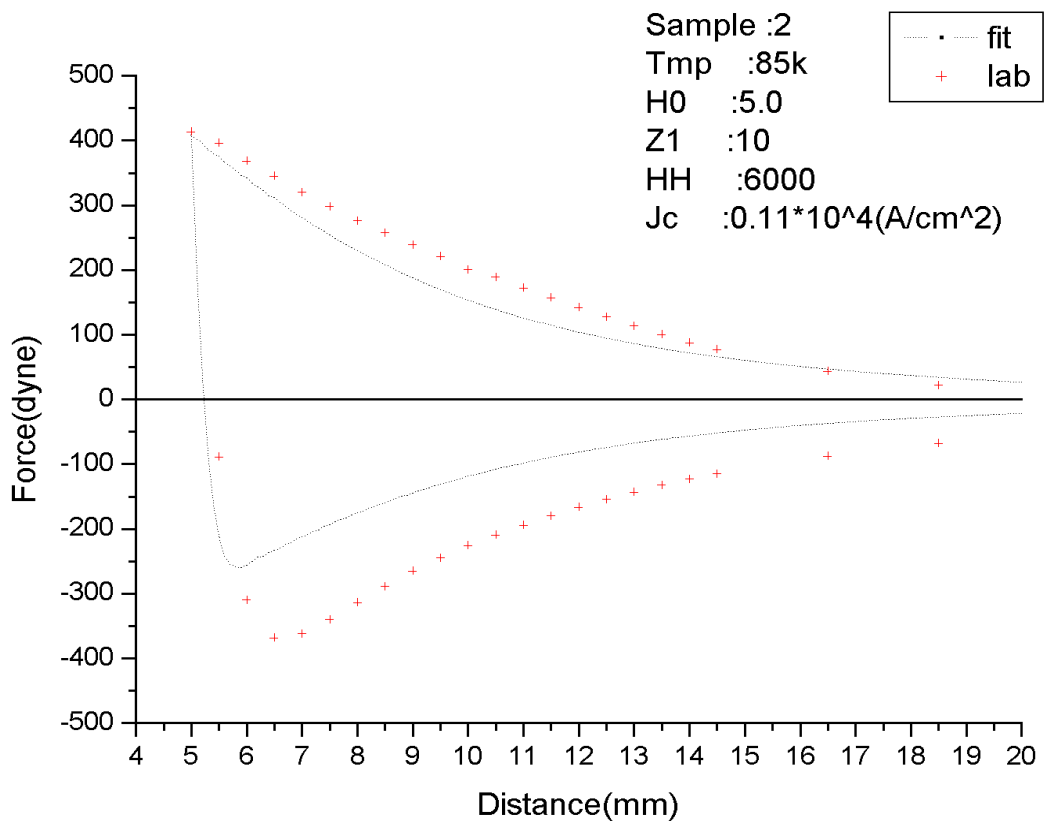
圖(5-9) 樣品二磁浮力實驗值與模擬結果比較



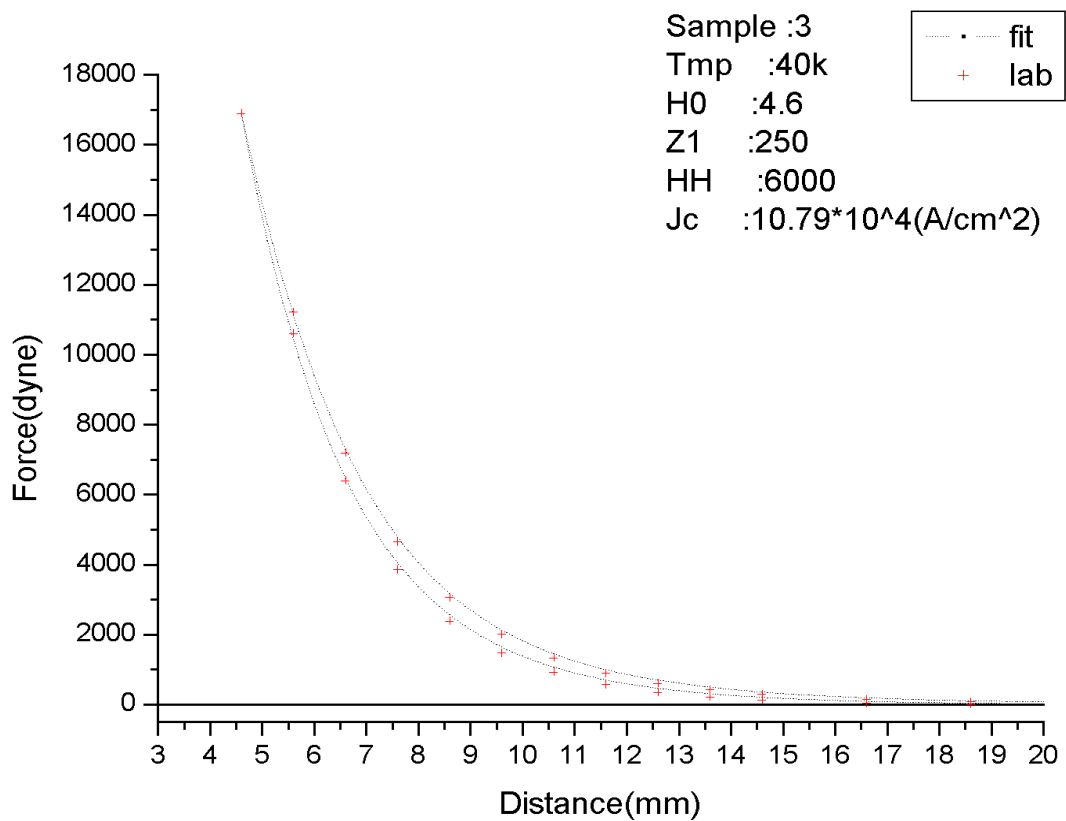
圖(5-10) 樣品二磁浮力實驗值與模擬結果比較



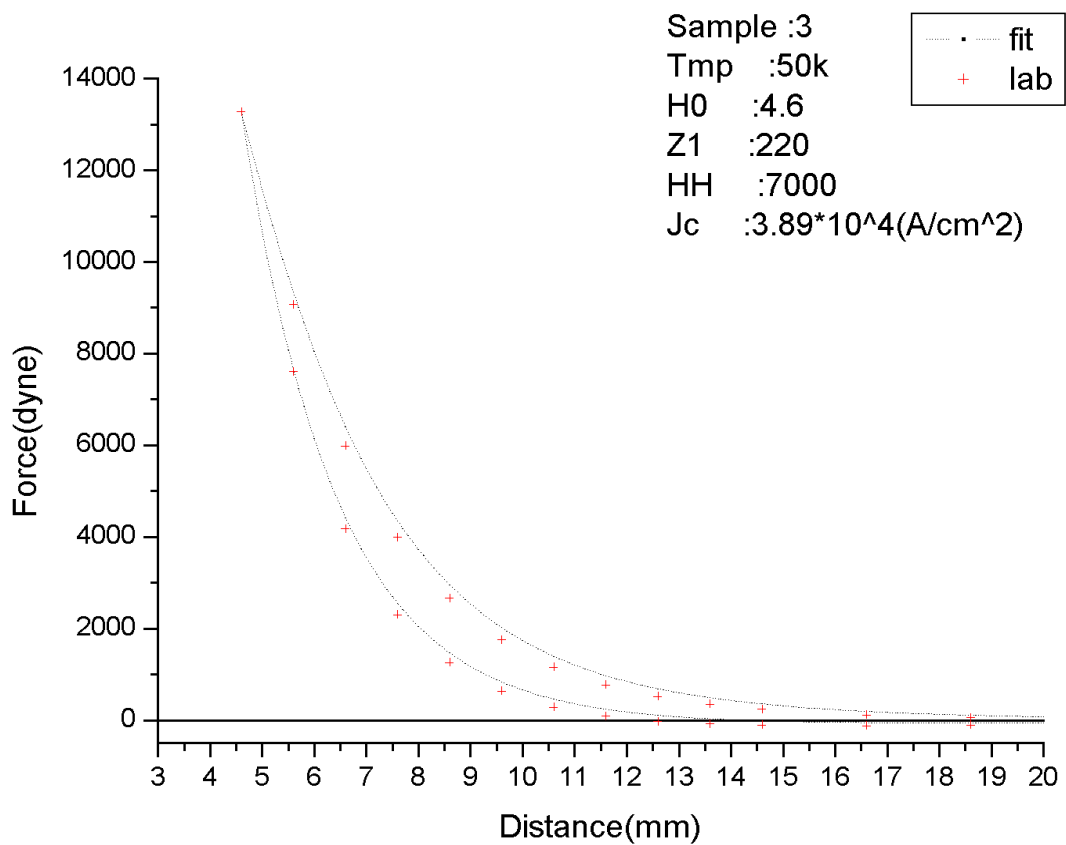
圖(5-11) 樣品二磁浮力實驗值與模擬結果比較



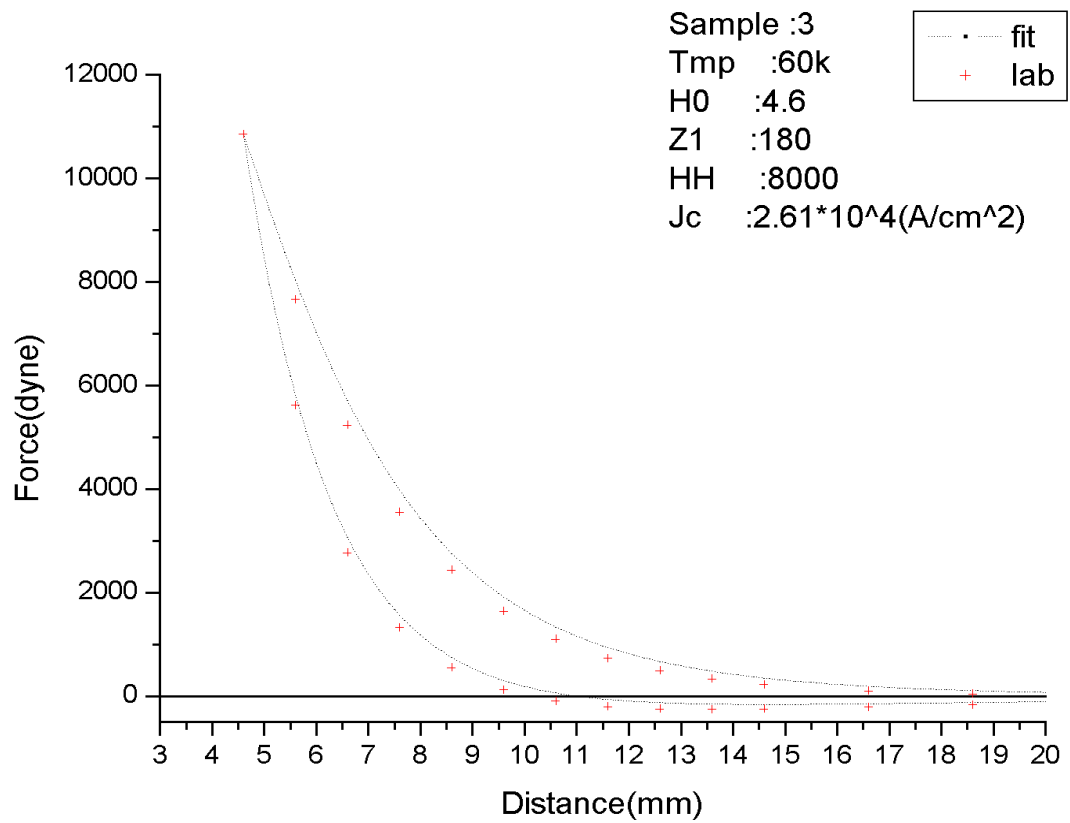
圖(5-12) 樣品二磁浮力實驗值與模擬結果比較



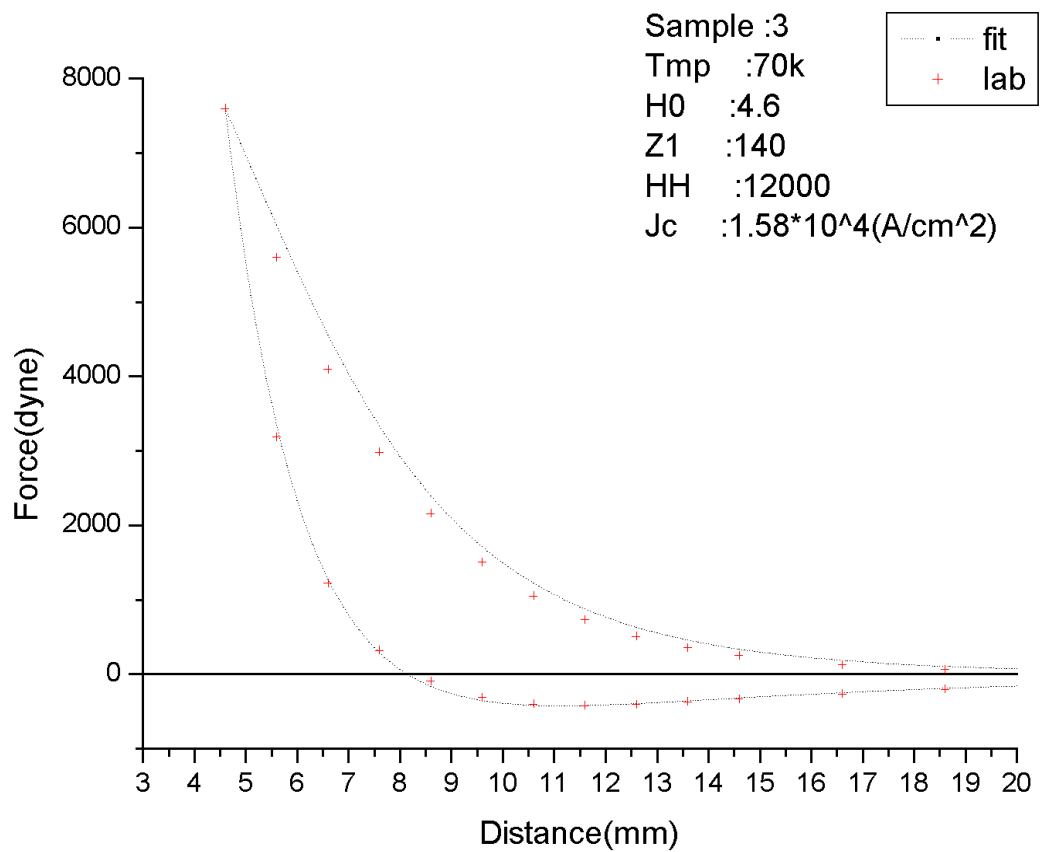
圖(5-13) 樣品三磁浮力實驗值與模擬結果比較



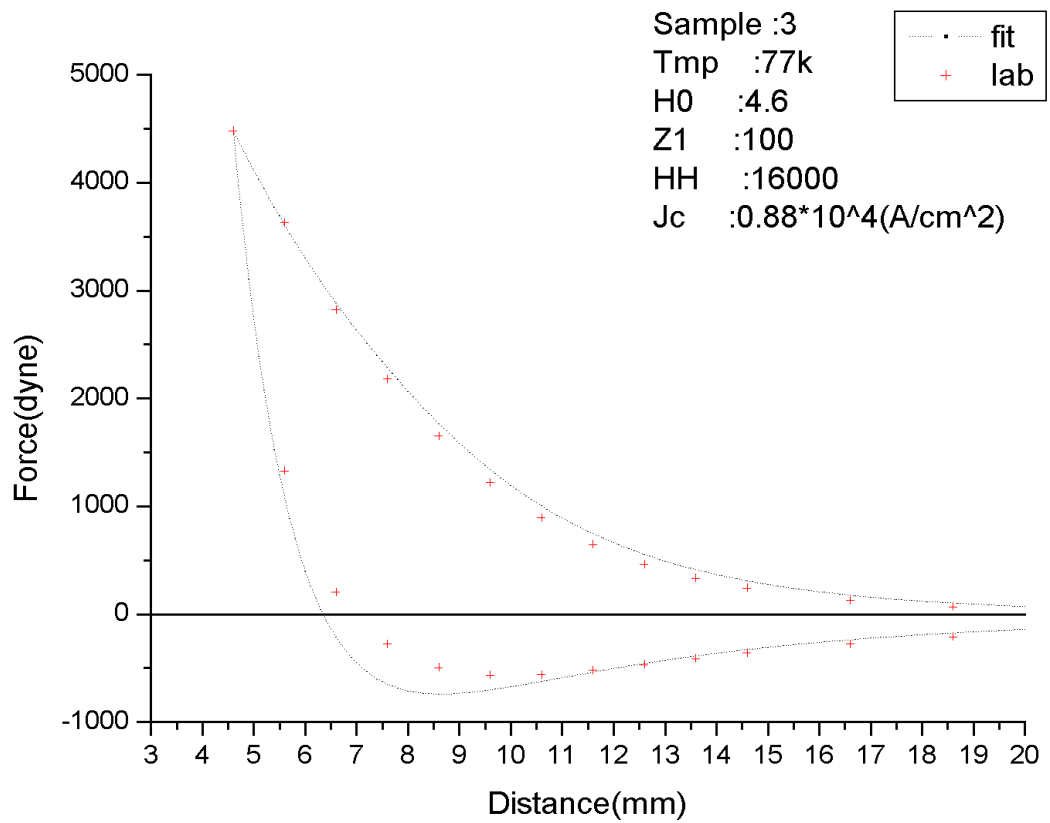
圖(5-14) 樣品三磁浮力實驗值與模擬結果比較



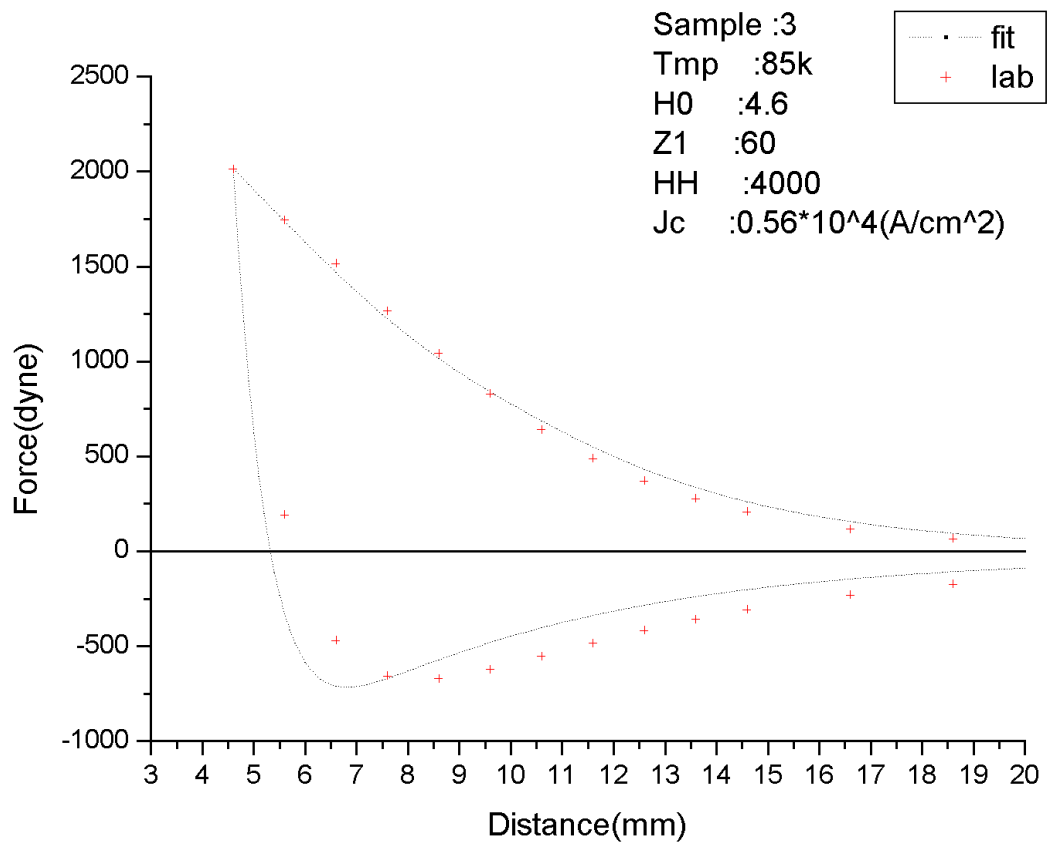
圖(5-15) 樣品三磁浮力實驗值與模擬結果比較



圖(5-16) 樣品三磁浮力實驗值與模擬結果比較



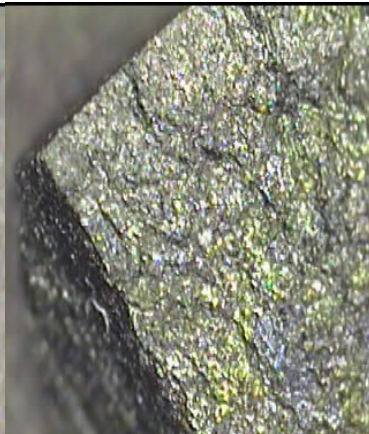
圖(5-17) 樣品三磁浮力實驗值與模擬結果比較



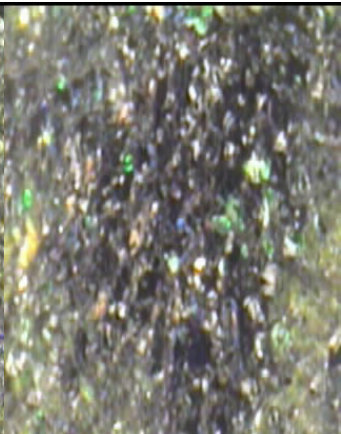
圖(5-18) 樣品三磁浮力實驗值與模擬結果比較



Sample1 x50



Sample1 x125



Sample1 x600



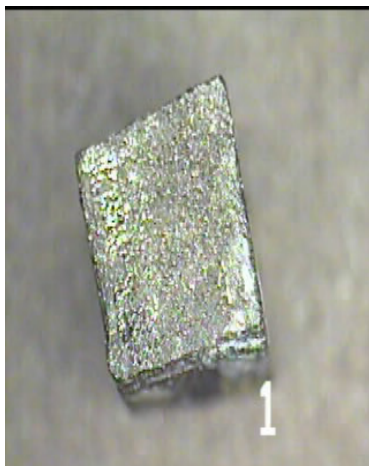
Sample2 x50



Sample2 x125



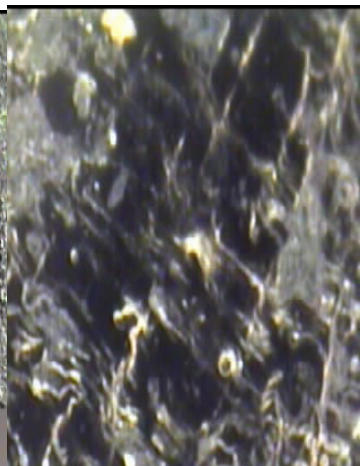
Sample2 x600



Sample3 x50



Sample3 x125



Sample3 x600

圖(5-19)

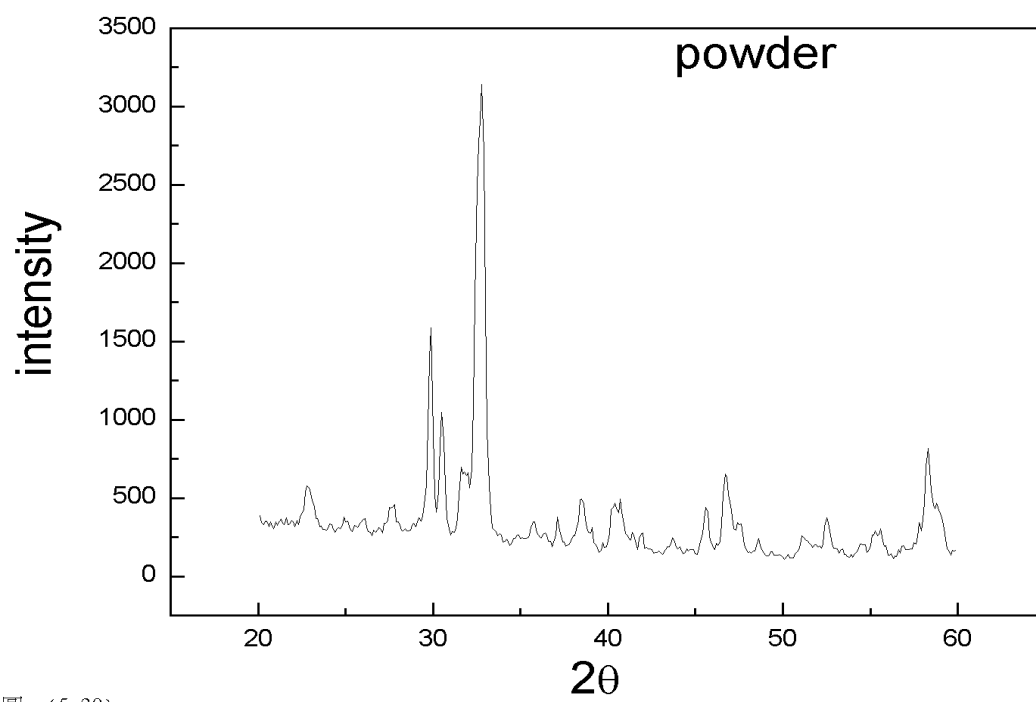


图 (5-20)

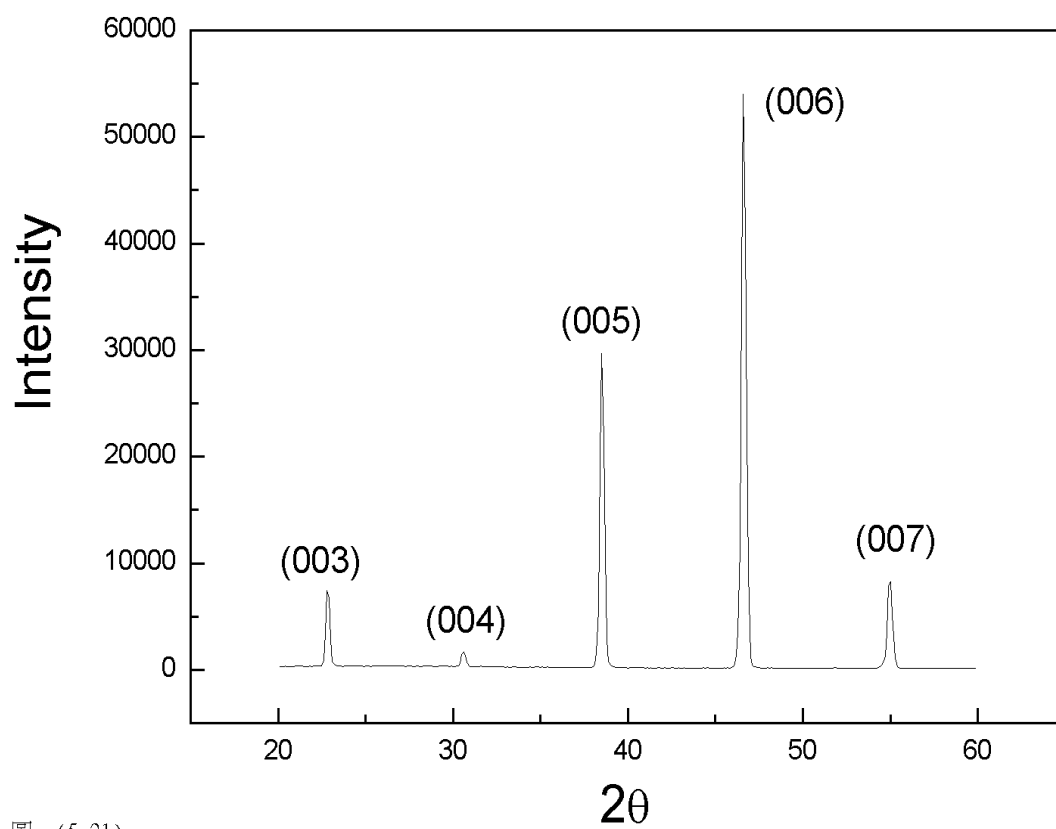
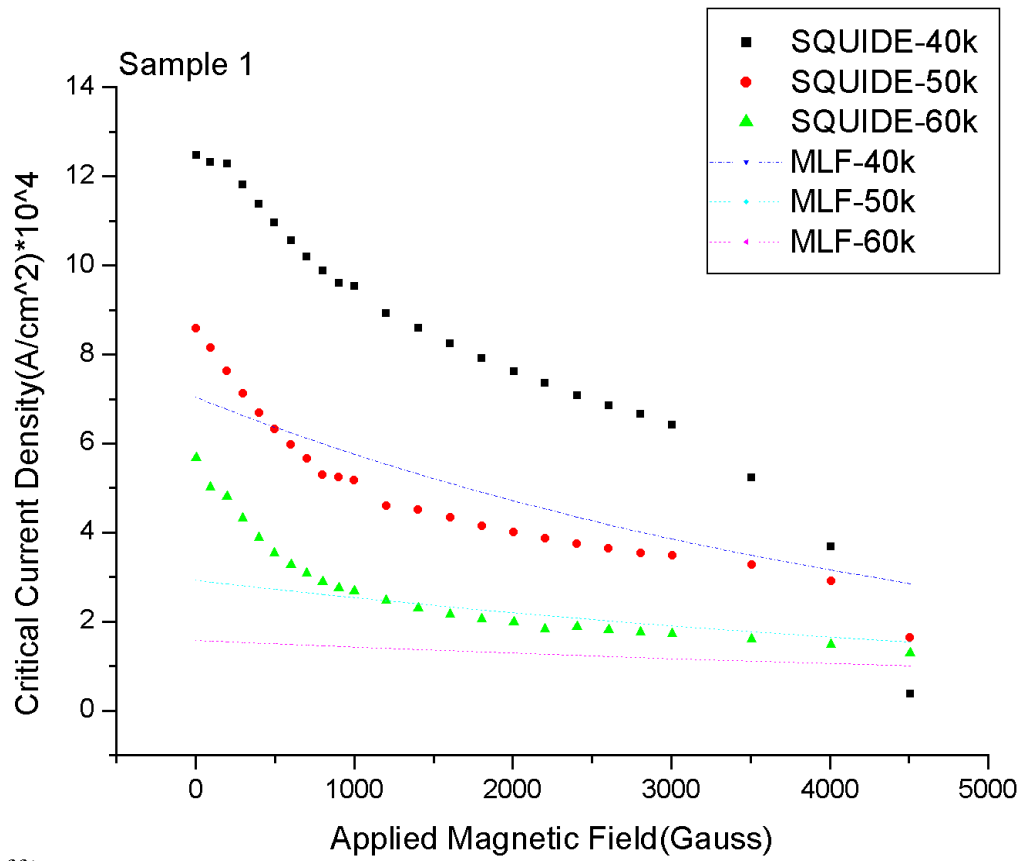
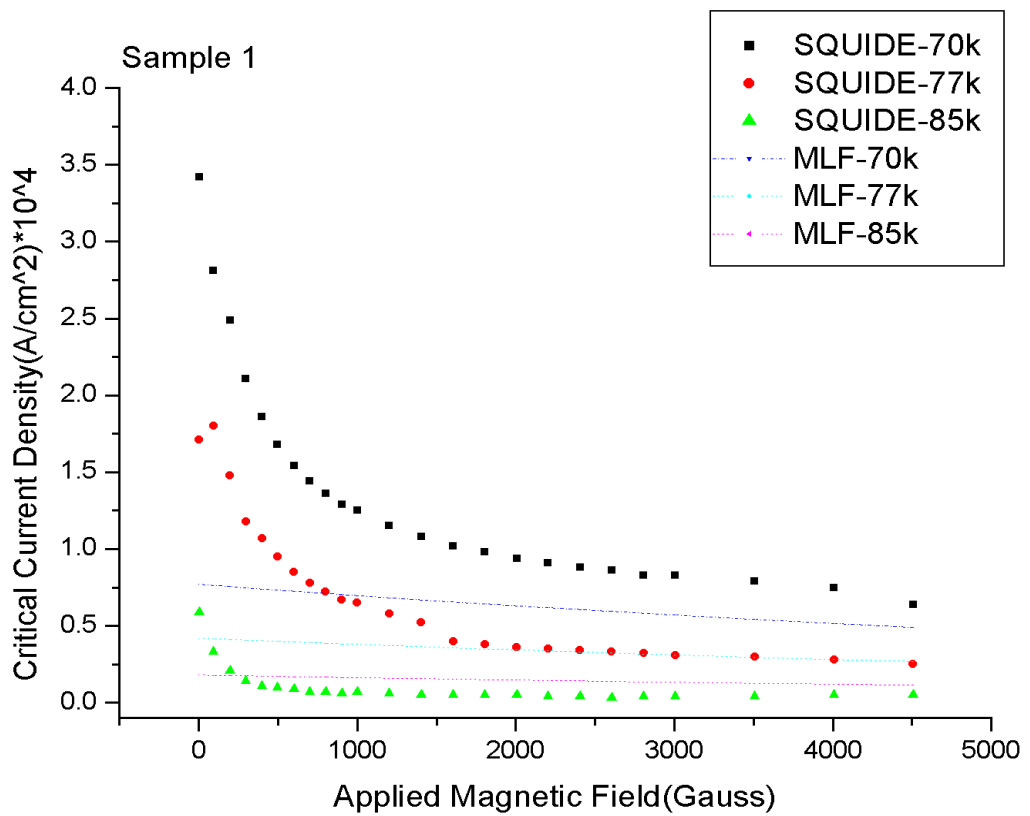


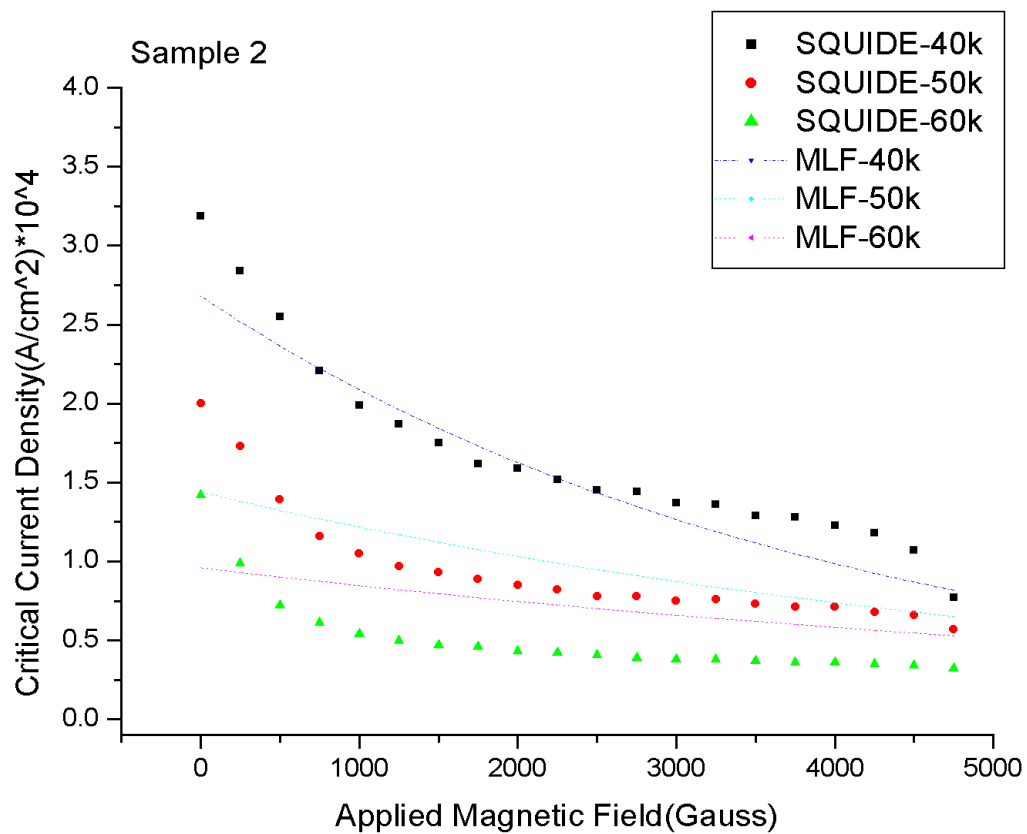
图 (5-21)



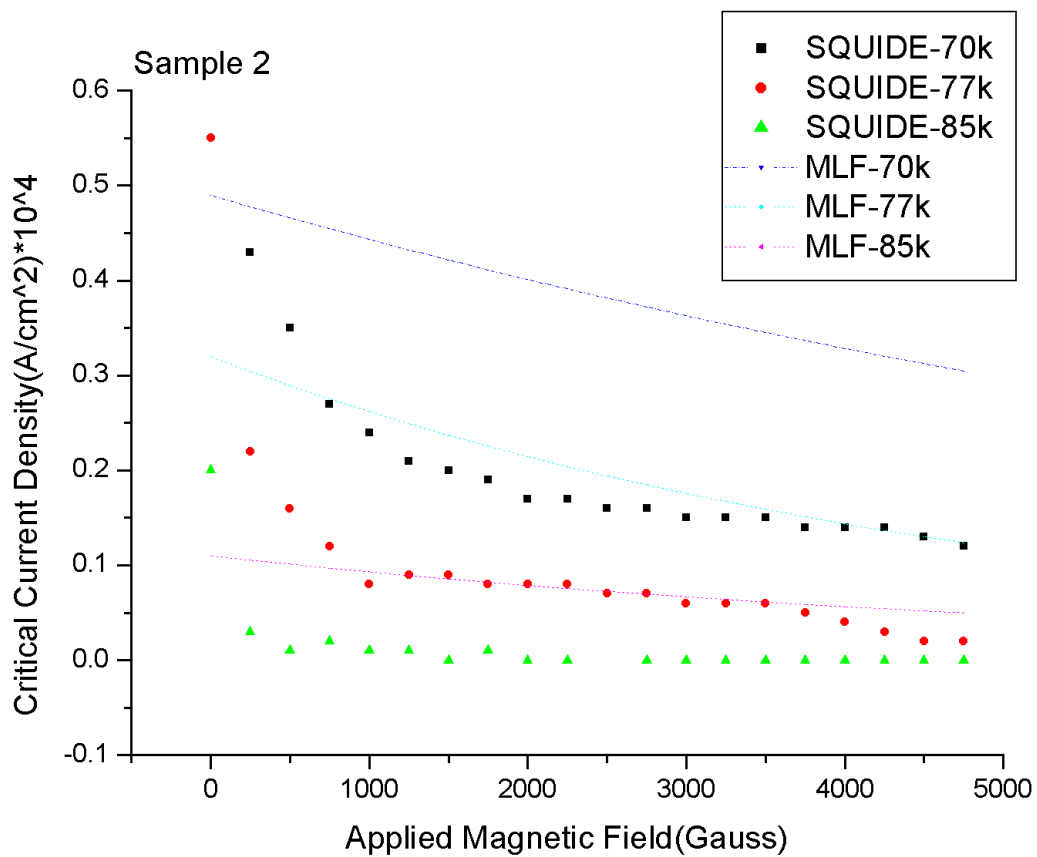
(5-22)



(5-23)



(5-24)



(5-25)

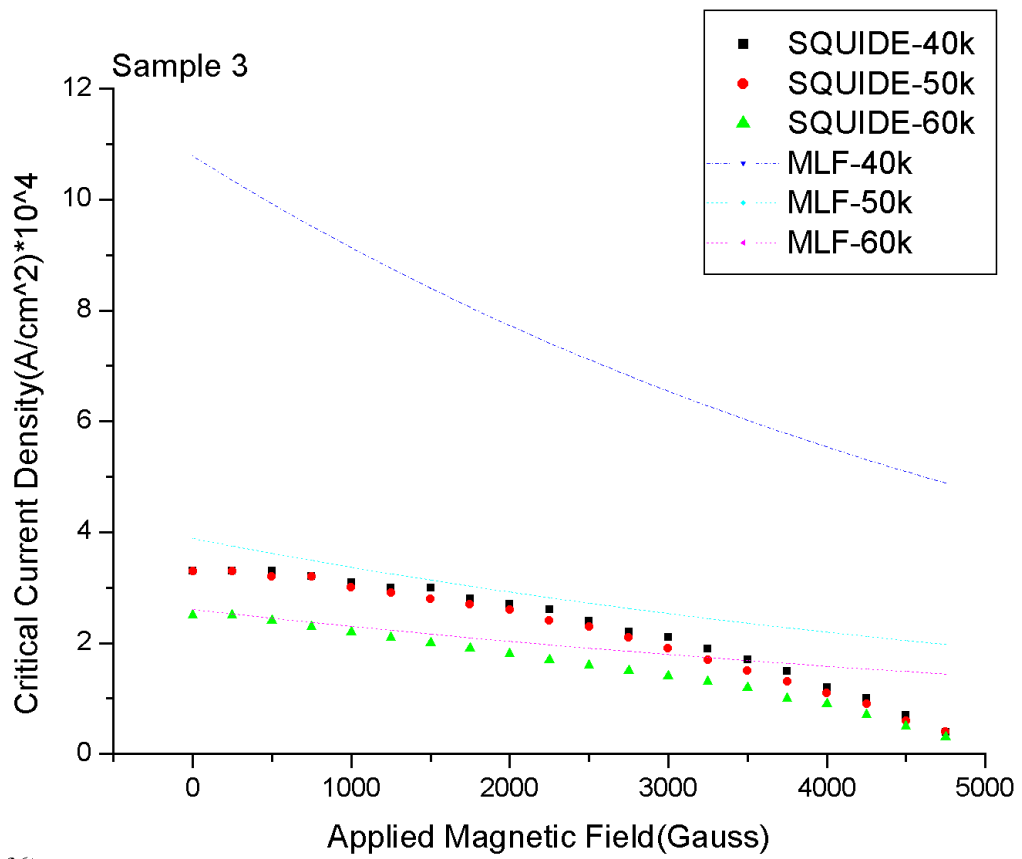


图 (5-26)

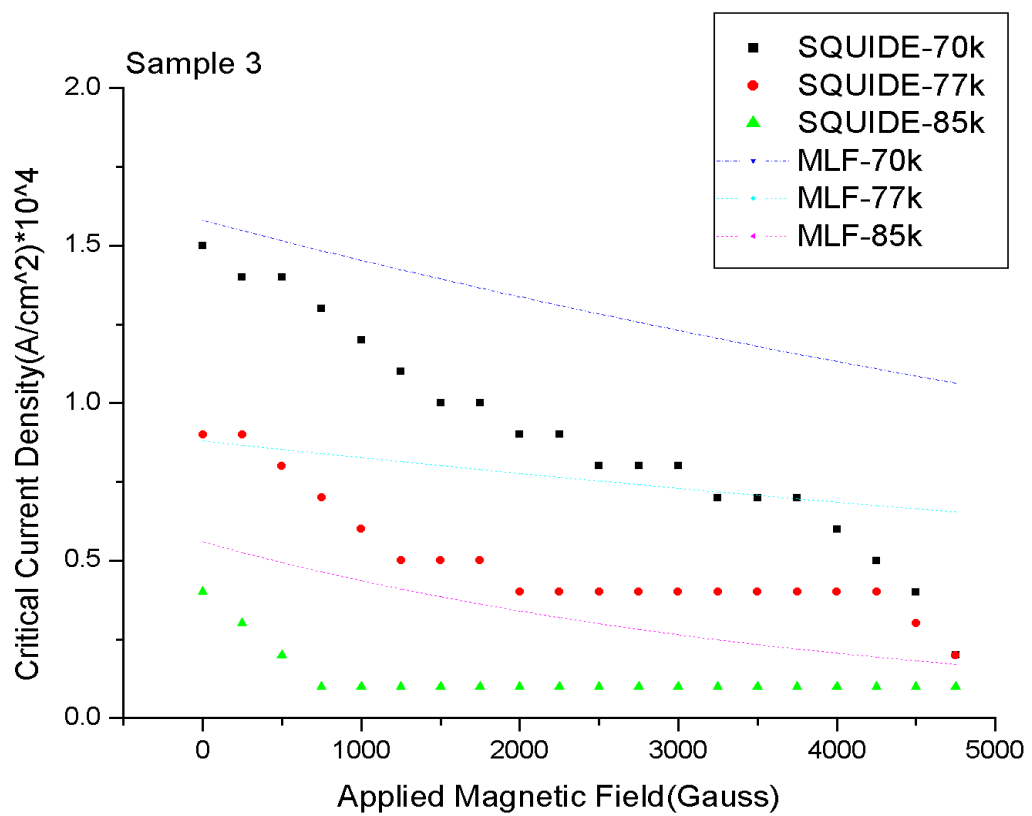


图 (5-27)

參考資料：

- [1] H. K. Onnes, Leiden Comm, 1911, 122b, 122c
- [2] W. Meissner and R. Ochsenfeld, Naturwiss, 21, 787 (1933)
- [3] A. A. Abrikosov, Zh, Eksperim, i teop, Fiz, 32, 1442 (1957)
- [4] H. Kupfer, I. Apfelstedt, W. Schauer, R. Flukiger, R. Meier Hirmer, and H. Wuhl
phys BCondensed Matter 69. 159-166 (1987)
- [5] B. D. Josephson, Phys. Lett. I, 251 (1962)
- [6] S. I. Yoo and R. W. McCallum, Physica C 210 (1993) 147 - 156
- [7] T. Izumi and Y. Shiohara, J. Mater. Res, Vol.7 No.1 (1992) 16 - 23
- [8] W. C. Chan, D. S. Jwo, Y. F. Lin and Y. Huang, Physica C 230, P. 349, 1994
- [9] D. N. Matthews, J. W. Cochrane and G. J. Russell, Physica C 249 (1995) 255 - 261
- [10] D.E. Farrell, S.B. Chandrasekar, M.R. DeGuire, M.M. Fang, V.G.Kogan, J.R. Clem,
and D.K.
Finnemore, Phys. Rev. B 36, 4025 (1987)
- [11] Y. Yeshurun, A. P. Malozemoff, A. Shaulov Review of Modern Physics, Vol. 68,
No3, July 1996